



OPTIMISATION ET REALISATION D'UNE PERIPHERIE PLANAR HAUTE TENSION A POCHE

Le Thui Ngo

► To cite this version:

Le Thui Ngo. OPTIMISATION ET REALISATION D'UNE PERIPHERIE PLANAR HAUTE TENSION A POCHE. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 1997. Français. NNT : . tel-00908694

HAL Id: tel-00908694

<https://theses.hal.science/tel-00908694>

Submitted on 25 Nov 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THESE

Présentée par

NGO Le Thuy

Pour obtenir le titre de **DOCTEUR**

de **L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

(Arrêté Ministériel du 30 Mars 1992)

(Spécialité: **Génie Electrique**)

* * * * *

OPTIMISATION ET REALISATION D'UNE PERIPHERIE PLANAR HAUTE TENSION A POCHE

* * * * *

Date de soutenance: **27 Novembre 1997**

Composition du Jury

Président:	Pierre MERLE (Rapporteur)
Rapporteur:	Jean-Louis SANCHEZ
Examineurs:	Robert PERRET Jacques ARNOULD
Directeurs de thèse:	Nadine GUILLEMOT Christian SCHAEFFER

THESE

Présentée par

NGO Le Thuy

Pour obtenir le titre de **DOCTEUR**

de **L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

(Arrêté Ministériel du 30 Mars 1992)

(Spécialité: **Génie Electrique**)

* * * * *

OPTIMISATION ET REALISATION D'UNE PERIPHERIE PLANAR HAUTE TENSION A POCHE

* * * * *

Date de soutenance: **27 Novembre 1997**

Composition du Jury

Président:	Pierre MERLE (Rapporteur)
Rapporteur:	Jean-Louis SANCHEZ
Examineurs:	Robert PERRET Jacques ARNOULD
Directeurs de thèse:	Nadine GUILLEMOT Christian SCHAEFFER

REMERCIEMENTS

Les travaux faisant l'objet de cette étude ont été réalisés aux laboratoires LEG et LPCS de l'INPG, avec le soutien technique du CIME en collaboration avec le société IBS et le laboratoire LPDSO de la faculté de St Jérôme - Marseille. Ils n'auraient pu réussir sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes que je tiens à remercier ici.

Je remercie madame Nadine Guillemot, professeur de l'INPG, directeur du CIME, qui m'a fait l'honneur d'être mon directeur de thèse. Son expérience et ses conseils éclairés m'ont permis de mener à bien mes recherches.

Monsieur Pierre Merle, professeur de l'université Montpellier II et monsieur Jean-Louis Sanchez, chargé de recherche au LAAS/CNRS de Toulouse, ont accepté la charge d'être les rapporteurs de cette thèse. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont apporté à cette étude et pour leurs conseils suite à leur lecture du manuscrit.

Monsieur Robert Perret, professeur de l'INPG, président de la fédération ELESa m'a fait l'honneur de participer au jury qu'il en soit remercié.

Je remercie vivement monsieur Christian Schaeffer, maître de conférence au LEG/ENSIEG, qui tout au long de l'encadrement de ce travail, m'ont apporté aide, conseils et amitié, l'aboutissement de cette étude lui doit beaucoup.

Monsieur Jacques Arnould, conseiller technique de la société IBS, a encadré ce travail. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour son soutien, sa disponibilité sans limites, son investissement personnel considérable et de m'avoir fait profiter pleinement de ses grandes connaissances dans le domaine des composants de puissance. Qu'il soit remercié pour son amitié ses conseils et son soutien sans condition lors de nos nombreuses discussions.

Je tiens à remercier sincèrement mon mari, monsieur Jean Barbaroux, ingénieur de recherche au LEG/ENSIEG, qui a su répondre à mes attentes en faisant preuve d'un grand savoir-faire pour la réalisation de l'appareil de test de diodes haute tension, pour son aide dans la rédaction de cette thèse et son soutien moral continu qu'il a apporté pendant toutes les années de l'étude.

Je ne peux manquer de témoigner ma reconnaissance à madame Jumana Boussey, chargé de recherche au LPCS/ENSERG pour la correction qu'elle a apportée lors de la rédaction et ses conseils avisés qu'elle a su dispenser.

Je tiens à porter ici une mention particulière à l'équipe technologique du CIME, à savoir monsieur Jean-Michel Terrot, monsieur Christian Uzel, monsieur Bruno Gonzalez et madame Irène Pheng, dont la compétence et la rigueur n'ont d'égal que leur gentillesse et leur patience. Je leur adresse l'expression de ma profonde gratitude et le grand merci pour avoir bien voulu partager leurs connaissances et leur temps.

Au terme de cette étude je tiens également à remercier:

- Monsieur Francis Floret, maître de conférence au LPDSO de la faculté de St Jérôme - Marseille pour son aide lors de la réalisation des différents lots de masques.*
- Monsieur Laurent Roux directeur de société IBS pour le soutien lors de la réalisation technologique.*
- Messieurs Alexandre Chagoya et Bernard Bosc du service "Conception et Test" du CIME pour leur soutien lors de mes aventures dans le réseau UNIX.*
- Mesdemoiselles Martine Gri et Nathalie Mathieu ainsi que monsieur Rabah Kies du LPCS/ENSERG pour leurs conseils et leur amitié pendant les années de l'étude.*

J'ai beaucoup apprécié l'aide dans la rédaction de cette thèse ainsi que les qualités amicales des personnes présentes au secrétariat du CIME. Je pense en particulier à Christine Rollin, Odile Blanchard, Dominique Brame et Véronique Just.

Mes remerciement vont aussi aux jeunes doctorants Corinne Perret et Charlotte Gillot du LEG/ENSIEG pour leur aide dans la caractérisation des dispositifs, leur amitié, et leurs conseils dans la présentation de thèse.

TABLE DES MATIERES

NOMENCLATURE DES GRANDEURS UTILISEES.....	1
INTRODUCTION GENERALE	5
Chapitre I - CLAQUAGE PAR AVALANCHE ET PROTECTION PERIPHERIQUE D'UNE JONCTION DITE PLANAR.....	7
Introduction.....	7
I.1 Claquage par avalanche	7
I.1.1 Mécanisme de claquage par avalanche	7
I.1.2 Coefficients d'ionisation.....	8
I.2 Claquage d'une jonction PN plane dissymétrique.....	10
I.2.1 Jonction abrupte plane dissymétrique	10
I.2.2 Jonction abrupte tronquée.....	13
I.3 Jonction planar et protection périphérique	15
I.3.1 Jonction planar.....	15
I.3.2 Expressions analytiques pour le claquage des jonctions cylindriques et sphériques.....	17
I.3.3 Protection périphérique	18
I.3.3.1 MESA.....	18
I.3.3.2 Electrode de champ.....	19
I.3.3.3 Anneaux de champ.....	21
I.3.3.4 Couche semi - résistive	22
I.3.3.5 Implantation latérale.....	22
Conclusion du chapitre I	24
Chapitre II - ETUDE ET OPTIMISATION D'UNE PERIPHERIE PLANAR MONOPOCHE HAUTE TENSION.....	25
Introduction.....	25
II.1 Dimensionnement d'une périphérie planar monopoche haute tension	26
II.2 Comportement électrique bidimensionnel de la périphérie planar monopoche.....	28
II.2.1 Présentation du logiciel ATLAS/PISCES	28
II.2.1.1 Module PISCES.....	29
II.2.1.2 Structure et maillage initial.....	30
II.2.1.3 Modèles physiques.....	31
II.2.2 Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de l'implantation de la poche.....	35

II.2.3 Détermination de la profondeur et de la dose active de la poche optimale ...	41
II.2.4 Distribution du champ électrique dans la périphérie monopoeche	42
II.2.5 Tenue en tension en fonction de la résistivité du substrat	47
II.2.6 Tenue en tension en fonction de la longueur L_{π} de la poche.....	48
Conclusion du chapitre II	49

Chapitre III - REALISATION DE DIODE A POCHE HAUTE TENSION

(DPHT)	51
Introduction	51
III.1 Optimisation des procédés technologiques	51
III.1.1 Présentation du logiciel ATHENA/SUPREM.....	51
III.1.1.1 Structure et maillage initial	52
III.1.1.2 Modèles physiques SUPREM	52
III.1.2 Dose active en fonction des paramètres technologiques	54
III.1.2.1 Energie d'implantation.....	55
III.1.2.2 Dose implantée.....	56
III.1.2.3 Temps de diffusion	56
III.1.2.4 Ambiance de diffusion	57
III.2 Méthodes de caractérisation	59
III.2.1 Profils d'impuretés par SRP.....	59
III.2.1.1 Méthode SRP.....	59
III.2.1.2 Profils de porteurs.....	61
III.2.2 Caractérisation électrique.....	61
III.2.2.1 Résistance carré par 4 pointes	61
III.2.2.2 Caractérisation de tension de claquage	62
III.3 Réalisation des DPHT monopoeche	63
III.3.1 Masques et principales étapes technologiques des DPHT C1 et C2.....	63
III.3.1.1 Choix du silicium.....	66
III.3.1.2 Oxydation de champ	66
III.3.1.3 Poche π	67
III.3.1.4 Couche P+.....	73
III.3.1.5 Couche N+ face avant (AV) et arrière (AR)	75
III.3.1.6 Ouverture des contacts et métallisation.....	76
III.3.2 Tensions de claquage obtenues	79
Conclusion du chapitre III	83

Chapitre IV - OPTIMISATION ET REALISATION D'UNE PERIPHERIE PLANAR BIPOCHE HAUTE TENSION

Introduction	84
---------------------------	----

Etat de l'art.....	84
IV.1 Optimisation d'une périphérie planar bipoche.....	87
IV.1.1 Périphérie bipoche - principe.....	87
IV.1.2 Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des doses actives des poches extérieure ($Q^*\pi_1$) et intérieure ($Q^*\pi_2$)	88
IV.1.2.1 Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active de la poche intérieure	88
IV.1.2.2 Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active de la poche extérieure	90
IV.1.3 Tenue en tension en fonction de la répartition des longueurs des poches extérieure ($L\pi_1$) et intérieure ($L\pi_2$): $BU = f(L\pi_1/L\pi_2)$	92
IV.2 Réalisation des DPHT bipoche.....	94
IV.2.1 Masques et principales étapes technologiques des DPHT C3	92
IV.2.2 Tension de claquage des DPHT bipoche.....	101
Conclusion du chapitre IV	102
 Chapitre V - COURANT DE FUITE DES DIODES A POCHE HAUTE TENSION	 103
Introduction.....	103
V.1 Courant de fuite des DPHT	104
V.1.1 Courant de fuite d'une jonction PN.....	104
V.1.2 Oxyde de silicium en surface.....	107
V.1.2.1 Oxydation du silicium	107
V.1.2.2 Charges dans l'oxyde.....	108
V.1.3 Influence des charges fixes positives à l'interface SiO_2/Si sur le courant de fuite des DPHT	110
V.1.4 Courant de fuite des DPHT en fonction de la température.....	112
V.1.5 Implantation Phosphore.....	115
V.1.6 Implantation Bore	118
V.2 Influence des charges dans l'oxyde de surface sur la tenue en tension des DPHT	119
V.2.1 Influence des charges fixes positives à l'interface SiO_2/Si sur la tenue en tension de la périphérie monopoeche.....	120
V.2.2 Influence des charges fixes positives à l'interface SiO_2/Si sur la tenue tension de la périphérie bipoche	123
Conclusion du chapitre V.....	126
 CONCLUSIONS GENERALES	 128

BIBLIOGRAPHIE	131
----------------------------	------------

ANNEXES	140
Annexe I.1 Calcul de zone v (PvN ou PvP), entrée avec tension de claquage.....	141
Annexe I.2 Calcul de zone v (PvN ou PvP), entrée avec résistivité de zone v	144
Annexe II.1 Fichiers d'entrée typiques du simulateur ATLAS/PISCES	147
Annexe II.2 Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de l'implantation de poche .	149
Annexe III.1 Fichiers d'entrée typiques du simulateur ATHENA/SUPREM	152
Annexe III.2 Diagramme de cheminement DPHT C1	155
Annexe III.3 Diagramme de cheminement DPHT C2.....	159
Annexe III.4 Disposition générale de DPHT C1 monopoches sur la tranche.....	163
Annexe III.5 Disposition générale de DPHT C2 monopoches sur la tranche.....	164
Annexe IV.1 Diagramme de cheminement DPHT C3.....	165
Annexe IV.2 Disposition générale de DPHT C3 bipoches sur la tranche	169
Annexe V.1 Résultats des mesures de L_{diff} et I_r pour la manipulation "4 quarts"..	170

NOMENCLATURE DES GRANDEURS UTILISEES

Constantes physiques

k	constante de Boltzmann	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$
q	charge de l'électron	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
ϵ_0	permittivité	$8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F.cm}^{-1}$

Constantes du silicium

E_g	énergie de la bande interdite	1,12 eV
n_i	concentration intrinsèque	$1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ à 300 K
$\epsilon_r(\text{Si})$	constante diélectrique du silicium	11,9
ϵ_{Si}	permittivité	$1,05 \cdot 10^{-12} \text{ F.cm}^{-1}$

Constantes de l'oxyde

$\epsilon_r(\text{ox})$	constante diélectrique relative	3,9
ϵ_{ox}	permittivité de l'oxyde	$0,35 \cdot 10^{-12} \text{ F.cm}^{-1}$

Symboles

Description

$A_n(\text{cm}^{-1}), b_n(\text{V.cm}^{-1})$	constantes pour les coefficients d'ionisation des électrons
$A_p(\text{cm}^{-1}), b_p(\text{V.cm}^{-1})$	constantes pour les coefficients d'ionisation des trous
$\alpha_{\text{eff}}(\text{cm}^{-1})$	coefficient d'ionisation effectif
$\alpha_n, \alpha_p(\text{cm}^{-1})$	coefficients d'ionisation des électrons et des trous
$BU(\text{V})$	tension de claquage
$BU_p(\text{V})$	tension de claquage d'une jonction plane unidimensionnelle sans limitation de zone de charge d'espace (non tronquée)
$BU_{\text{cyl}}, BU_{\text{sph}}(\text{V})$	tensions de claquage cylindrique et sphérique d'une jonction planar
$C(\text{cm}^{-3})$	concentration
$C_{\text{max}\pi}(\text{cm}^{-3})$	concentration maximale de poche π
$C_s(\text{cm}^{-3})$	concentration en surface
$C_{s\pi}(\text{cm}^{-3})$	concentration en surface de poche π
$C_{s\pi 1}, C_{s\pi 2}(\text{cm}^{-3})$	concentration en surface des poches $\pi 1$ et $\pi 2$
$\chi(\text{eV})$	affinité électrique
$d(\mu\text{m})$	distance (cote masque)
$D_n, D_p(\text{cm}^2.\text{s}^{-1})$	coefficients de diffusion des électrons et des trous
DPHT	diode à poche haute tension
$\Delta P^+\pi(\mu\text{m})$	recouvrement des zones P^+ et π (cote masque)
$e_{\text{ox}}(\mu\text{m})$	épaisseur de la couche d'oxyde

e_{nitru} (μm)	épaisseur de la couche isolante
E (V.cm^{-1})	champ électrique
E_{crit} (V.cm^{-1})	champ électrique critique
E_F (eV)	niveau de Fermi
E_M (V.cm^{-1})	champ électrique maximal au claquage
ϕ_m (eV)	hauteur de barrière métal - semiconducteur
G	taux de génération
I_n, I_p	intégrales d'ionisation des électrons et des trous
I_r (A)	courant inverse
J_{dif} (A.cm^{-2})	densité de courant de diffusion
$J_{géné}$ (A.cm^{-2})	densité de courant de génération thermique
J_n, J_p (A.cm^{-2})	densités de courants des électrons et des trous
L_{diff} (cm)	longueur de diffusion
L_{np}, L_{pn} (cm)	longueurs de diffusion des électrons dans la région P, des trous dans la région N
L_π (μm)	longueur de poche π (cote masque)
$L_{\pi 1}$ (μm)	longueur de poche extérieure $\pi 1$ (cote masque)
$L_{\pi 2}$ (μm)	longueur de poche intérieure $\pi 2$ (cote masque)
L_v (μm)	distance entre l'extrémité extérieure de la poche π et le bord de la tranche (cote masque)
m	coefficient de ségrégation
M_n, M_p	coefficients de multiplication des électrons et des trous
μ_n, μ_p ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	mobilités des électrons et des trous
n (cm^{-3})	concentration d'électrons dans le semiconducteur
N_A (cm^{-3})	concentration d'ions accepteurs (négatifs) dans le semiconducteur dopé P
N_C (cm^{-3})	densité d'états équivalents de la bande conduction
N_D (cm^{-3})	concentration d'ions donneurs (positifs) dans le semiconducteur dopé N
n_i (cm^{-3})	concentration intrinsèque
N^*_f (cm^{-2})	nombre de charge par unité de surface
N_v (cm^{-3})	dopage du substrat v
n_o (cm^{-3})	concentration d'électrons (négatif) en équilibre thermodynamique dans le semiconducteur
n_s (cm^{-3})	concentration d'électrons en surface
N_v (cm^{-3})	densité d'états équivalents de la bande valence
η (%)	pourcentage de bore active après diffusion
v (cm^{-3})	concentration de la zone à haute résistivité

Nomenclature des grandeurs utilisées

p (cm ⁻³)	concentration de trous (positifs) dans le semiconducteur
p_o (cm ⁻³)	concentration des trous (positifs) en équilibre thermodynamique dans le semiconducteur
p_s (cm ⁻³)	concentration des trous (positifs) en surface
Q^*_{ext} (C.cm ⁻²)	charges à l'extérieure en surface de couche d'oxyde
Q^*_{it} (C.cm ⁻²)	charges d'interface SiO ₂ /Si
Q^*_f (C.cm ⁻²)	charges fixes dans l'oxyde
Q^*_m (C.cm ⁻²)	charges ioniques mobiles
Q^*_{ot} (C.cm ⁻²)	charges piégées dans l'oxyde
$Q^*_{\pi}, Q^*_{\pi opt}$ (cm ⁻²)	dose active et dose active optimale dans la poche π
$Q^*_{\pi 1}, Q^*_{\pi 2}$ (cm ⁻²)	dose active dans la poche $\pi 1$ et $\pi 2$
$Q^*_{\pi eq}$ (cm ⁻²)	charges équivalents implantées dans la poche π
Q^*_{ss} (C.cm ⁻²)	charges dans l'oxyde et à l'interface SiO ₂ /Si
ρ (Ω .cm)	résistivité du semiconducteur
r_j (μ m)	rayon de courbure d'une jonction planar
ρ_F (C.cm ⁻³)	densité de charge fixés dans un matériau isolant.
ρ_v (Ω .cm)	résistivité de la zone v à haute résistivité
r_{p+} (μ m)	rayon du cercle central P ⁺ (cote masque)
R_s (Ω)	valeur de la résistance de constriction
R_{\square} (Ω/\square)	résistance caré
SEG.E (eV)	énergie d'activation
SEG.0	rapport de la concentration de dopant dans silicium par rapport avec celle dans l'oxyde
T (K)	température absolue
τ (s)	durée de vie de génération
τ_n, τ_p (s)	durée de vie des électrons et des trous
U_{app} (V)	tension appliquée
U_n, U_p	vitesse de recombinaison des électrons et de trous
U_{SRH} (cm ⁻¹)	recombinaison Shockley Read Hall
U_{AUGER} (cm ⁻¹)	recombinaison Auger
U, U_r (V)	tension inverse
U_{app} (V)	tension appliquée
V	potentiel
V_{sat} (cm.s ⁻¹)	vitesse de saturation des porteurs dans silicium
W_c (μ m)	largeur de la zone de charge d'espace au moment du claquage pour la jonction plane
W_M (μ m)	largeur maximale de la zone de charge d'espace au claquage

W_V (μm)	épaisseur de la zone à haute résistivité
W_{Vopt} (μm)	largeur optimale de la zone de charge d'espace au claquage
x_j (μm)	profondeur de jonction
$x_{j\pi}$ (μm)	profondeur de la poche π
$x_{j\pi1}, x_{j\pi2}$ (μm),	profondeur des poches extérieure $\pi1$, et intérieure $\pi2$
x_{jP+} (μm)	profondeur de la couche P^+
Ψ (V)	potentiel électrostatique

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le domaine des composants de puissance connaît, aujourd'hui, une forte expansion. Les secteurs d'application sont de plus en plus vastes et réclament des exigences sans cesse croissantes en terme de fréquence de fonctionnement, de capacité à commutation de fortes puissances (courant et tension élevés). Les principales études développées pour améliorer les tenues en tension, ont concerné d'une part la réalisation de matériaux faiblement dopés par la technique de transmutation neutronique et d'autre part le développement des techniques de protection périphérique. Le rôle de ces protections est de mieux répartir les équipotentielles à la surface de la structure et limiter ainsi des pics de champ électrique pour repousser la limite du claquage par avalanche.

A ce jour les efforts de recherche entrepris dans le domaine des associations MOS-Bipolaire tels que les IGBT, MCT ont conduit au développement de composant de puissance haute tension pouvant atteindre plusieurs kilovolts.

Des techniques ont été élaborées pour améliorer la tenue en tension de la structure planar telle que l'électrode de champ, les anneaux de champ, l'implantation latérale appelée "poche"... [6], mais aucune de ces techniques n'est universelle ni "idéale" pour la gamme de tension supérieure à 2000 V.

Dans ce travail nous nous sommes proposés de développer une filière technologique planar haute tension mieux adaptée que les périphéries existantes pour réalisation des dispositifs capable de tenir plus de 2000 V.

Pour mener à bien cette recherche, nous disposons de deux logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO): les logiciels ATLAS et ATHENA. Pour un dispositif, le logiciel ATLAS permet à partir de sa structure (matériau, géométrie, dopage...), de modèle et d'équations physiques de déduire ses caractéristiques électriques. Le logiciel ATHENA est un logiciel de simulation de procédés technologiques grâce auquel il est possible de simuler toutes les étapes de réalisation des composants à semiconducteur.

Dans le premier chapitre, nous rappelons les mécanismes de multiplication des porteurs par avalanche et les différents calculs analytiques de tension de claquage pour les jonctions PN planar. Ensuite nous présentons les différents types de protections périphériques existantes avec leur principe de fonctionnement et leurs règles de conception.

Le deuxième chapitre est consacré à l'optimisation périphérique monopoche. Nous avons choisi une diode de puissance PIN comme composant de test. La première partie est consacrée à la définition de la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active

dans la poche. Les résultats de cette étude nous permettent d'établir une méthodologie pour déterminer une périphérie monopoeche optimale. Dans la deuxième partie afin de mieux comprendre le comportement électrique d'une poche en fonction des doses actives, nous abordons une étude de la distribution du champ électrique dans la périphérie monopoeche. Dans la dernière partie nous présentons l'influence des autres paramètres comme la longueur de la poche et la résistivité du substrat sur la tenue en tension.

Au troisième chapitre avant de réaliser la périphérie monopoeche optimisée nous développons les résultats de l'étude de l'influence des différents paramètres technologiques sur le rendement du procédé d'implantation de poche. Nous présentons également les différentes étapes technologiques avec les résultats de caractérisation électrique et technologique. Nous exposons les analyses des résultats expérimentaux des deux lots DPHT C1 et DPHT C2 pour valider l'étude des différents paramètres sur la sensibilité de la tenue en tension de périphérie monopoeche.

Dans le quatrième chapitre, suite aux résultats des études et réalisations technologiques de périphérie monopoeche, nous abordons l'optimisation et la réalisation d'une périphérie bipoeche afin de minimiser la sensibilité de la tenue en tension par rapport à la dose implantée et surtout d'améliorer sa tenue en tension. Dans un premier temps nous traitons la sensibilité vis-à-vis des doses actives des poches et la répartition optimale des longueurs des poches. Ensuite, nous décrivons les étapes technologiques pour réaliser la périphérie bipoeche. Enfin, nous présentons également les résultats expérimentaux caractéristiques de la tenue en tension des composants réalisés.

Au cinquième chapitre nous nous intéressons plus particulièrement au courant de fuite des DPHT. En utilisant le logiciel ATLAS/PISCES nous étudions l'influence des charges fixes dans l'oxyde sur le courant de fuite et la tenue en tension des DPHT. Nous présentons les résultats de caractérisation du courant de fuite des DPHT en fonction de la température afin d'identifier son origine. Nous exposons l'effet sur le courant de fuite des implantations de phosphore et de bore dans l'oxyde ainsi que celui de l'implantation de phosphore sur la face arrière de la tranche de silicium .

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale dans laquelle nous rappelons les résultats le plus importants ainsi que les perspectives à envisager pour la poursuite de ce travail.

CHAPITRE I

Chapitre I

CLAQUAGE PAR AVALANCHE ET PROTECTION PERIPHERIQUE D'UNE JONCTION DITE PLANAR

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter les mécanismes de claquage par avalanche et leurs critères de détermination par le calcul des intégrales d'ionisation. Puis, ce seront les calculs analytiques des tensions de claquage pour des jonctions PN dans un cas simple et pour la jonction planar. Ensuite, nous montrerons les différents types de protections périphériques existant pour améliorer la tenue en tension des structures, leur principe de fonctionnement et leurs principales règles de conception.

I.1 CLAQUAGE PAR AVALANCHE

I.1.1 Mécanisme de claquage par avalanche

Le phénomène de claquage par avalanche dans une jonction PN se produit en présence de champ électrique élevé. Si le champ électrique atteint des valeurs de l'ordre de 10^5 V.cm^{-1} les porteurs accélérés ont alors une énergie suffisante pour ioniser par choc des atomes du réseau de silicium et créer des paires électron-trou qui créeront à leur tour de nouvelles paires électron-trou [2].

Ce mécanisme de multiplication des porteurs est régi par les coefficients M_p (pour les trous) et M_n (pour les électrons) qui représentent le rapport des courants avant et après traversée de la zone d'ionisation. La tension de claquage par avalanche est atteinte lorsque ces coefficients deviennent infinis, c'est à dire quand les intégrales d'ionisation ci-dessous I_p (1.1) et I_n (1.2) tendent vers l'unité.

$$I_p = \int_{x_n}^{x_p} \alpha_p \exp \left[- \int_{x_n}^x (\alpha_p - \alpha_n) dx' \right] dx = 1 - \frac{1}{M_p} \quad (1.1)$$

$$I_n = \int_{x_n}^{x_p} \alpha_n \exp \left[- \int_x^{x_p} (\alpha_n - \alpha_p) dx' \right] dx = 1 - \frac{1}{M_n} \quad (1.2)$$

Dans ces expressions x est la coordonnée ($x_p < x < x_n$), x_n et x_p sont les limites des zones de charges d'espace respectivement dans les zones N et P, α_n et α_p les coefficients d'ionisation des électrons et des trous.

I.1.2 Coefficients d'ionisation

Ces coefficients α_n et α_p sont les paramètres fondamentaux permettant de décrire le mécanisme d'avalanche : ils représentent le nombre de paires électron-trou produites par électron ou trou incident par centimètre parcouru dans la direction du champ électrique [2]. Les analyses du mécanisme d'ionisation [7, 8] permettent d'exprimer les coefficients α_n et α_p en fonction du champ électrique local et de divers paramètres physiques tels que l'énergie du photon optique, l'énergie d'ionisation, le libre parcours moyen, etc...

Plusieurs lois de variation de α_n et α_p en fonction du champ électrique ont été proposées. Les plus couramment utilisées sont celles données par CHYNOWETH [7]

$$\alpha_n = A_n \exp\left(-\frac{b_n}{|E|}\right) \quad (1.3)$$

$$\alpha_p = A_p \exp\left(-\frac{b_p}{|E|}\right) \quad (1.4)$$

dans lesquelles E est le champ électrique fonction de x et A_n , b_n , A_p , b_p sont des constantes. Les valeurs des constantes proposées par différents auteurs [7, 8, 9, 11] sont données dans le tableau ci-dessous (figure 1.1).

Auteurs	[7] A.G.Chynoweth	[8] Moll and Van Overstraeten	[9] Lee, Logan and al.	[11] Van Overstraeten and De Man
A_n (cm ⁻¹)	7,03 10 ⁵	5,5 10 ⁵	3,8 10 ⁶	7,03 10 ⁵
b_n (V. cm ⁻¹)	1,23 10 ⁶	1,65 10 ⁶	1,75 10 ⁶	1,23 10 ⁶
A_p (cm ⁻¹)	6,71 10 ⁵	1,81 10 ⁵	2,25 10 ⁷	1,58 10 ⁶
b_p (V. cm ⁻¹)	1,69 10 ⁶	1,65 10 ⁶	3,26 10 ⁶	2,04 10 ⁶

Figure 1.1 : Tableau des coefficients A_n , b_n , A_p , b_p d'après différents auteurs.

Les coefficients d'ionisation des différents auteurs [7, 8, 9, 11] tracés en fonction du champ électrique sont donnés dans la figure 1.2. L'augmentation extrêmement rapide des coefficients d'ionisation quand le champ électrique augmente est un facteur important pour analyser le claquage des composants de puissance [3].

La dispersion sur les coefficients d'ionisation est liée tant au principe de détermination expérimentale, qu'à une dépendance probable d'autres paramètres tels que le champ

électrique, et l'énergie de seuil pour les électrons. Cette dispersion rend l'estimation de la tension de claquage de la jonction PN difficile.

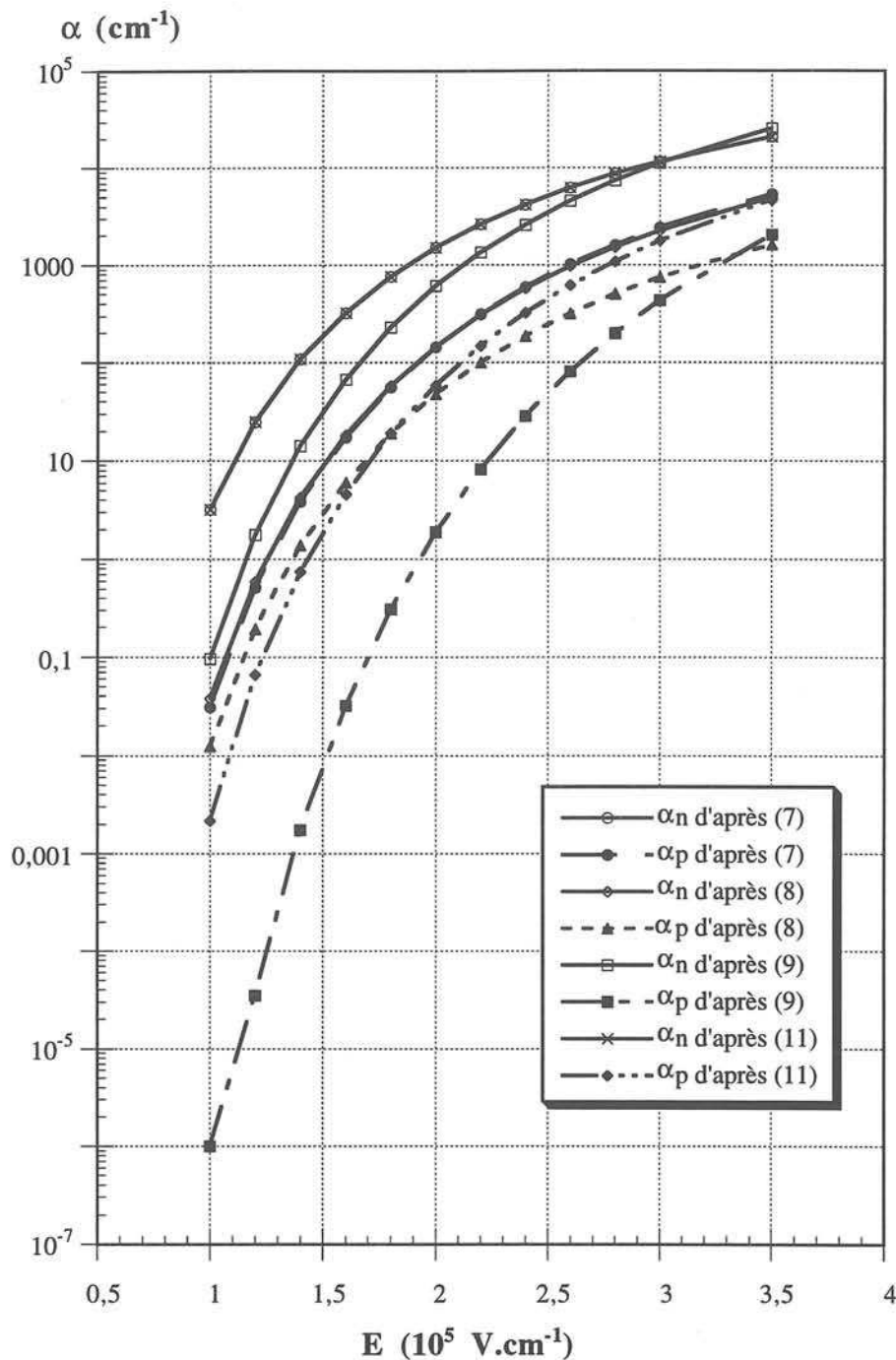


Figure 1.2 : Coefficients d'ionisation de différents auteurs [7, 8, 9, 11] en fonction du champ électrique

D'après VAN OVERSTRAETEN et DE MAN [11], les intégrales d'ionisations permettant de déterminer la tension de claquage sont respectivement I_p et I_n .

Pour simplifier, il est possible d'utiliser en supposant $\alpha_n(E)/\alpha_p(E) = C^{ste}$, un coefficient identique α_{eff} pour les électrons et les trous [10, 11]. Le claquage est produit lorsque

$$\int_{x_n}^{x_p} \alpha_{eff} dx = 1 \quad (1.5)$$

D'après FULOP [10] le coefficient α_{eff} s'écrit :

$$\alpha_{eff} = AE^7 \quad (1.6)$$

où A est une constante valant $1,8 \cdot 10^{-35} \text{ V}^{-7} \text{ cm}^6$

E: champ électrique ($\text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$)

D'après VAN OVERSTRAETEN et DE MAN [11] le coefficient α_{eff} s'écrit :

$$\alpha_{eff} = A \exp\left(-\frac{b}{|E|}\right) \quad (1.7)$$

où $A = 7,03 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $b = 1,468 \cdot 10^6 \text{ (V} \cdot \text{cm}^{-1})$

pour $1,75 \cdot 10^5 \leq E \leq 6,4 \cdot 10^5 \text{ (V} \cdot \text{cm}^{-1})$

Ces simplifications permettent de faire des calculs de claquage des jonctions PN dans des cas simples. La précision de la valeur calculée de la tension de claquage dépend des coefficients d'ionisation. La dispersion entre les valeurs de la tension de claquage en utilisant les différents coefficients d'ionisation est importante (par exemple entre les coefficients de VAN OVERSTRAETEN et DE MAN [11] et LEE [9] la différence de la tension de claquage calculée est de 20%). Les coefficients d'ionisation définis par VAN OVERSTRAETEN et DE MAN [11] sont utilisés souvent car ils semblent conduire à des résultats proches de l'expérience [13, 31].

I.2 CLAQUAGE D'UNE JONCTION PN PLANE DISSYMETRIQUE

I.2.1 Jonction abrupte plane dissymétrique

Pour une jonction plane, l'équation de Poisson unidimensionnelle peut s'écrire [2], avec $\rho(x)$ est la densité de charges d'espace donnée par (1.8)

$$\rho = q(p - n - N_D + N_A) \quad (1.8)$$

$$\Delta V(x) = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1.9)$$

$$V = -\int E(x) dx \quad (1.10)$$

La résolution en configurations unidimensionnelles des intégrales d'ionisation (1.1) et (1.2) et des équations (1.9) et (1.10) (dans l'hypothèse d'une jonction abrupte, plane, dissymétrique P^+N ou N^+P sans limitation de la zone de charge d'espace) permet de définir la tension de claquage BU et l'extension maximale de la zone de charge d'espace au moment du claquage par avalanche. D'après [6] on obtient :

$$BU = 4,5 \cdot 10^{13} N^{-3/4} \quad (1.11)$$

où : BU est la tension de claquage (V) et N le dopage (cm^{-3}) du côté le moins dopé.

$$W_M = 2,86 \cdot 10^{-6} (BU)^{7/6} \quad (1.12)$$

où : W_M est largeur maximale de la zone de charge d'espace au claquage (cm).

La figure 1.3 présente le profil du champ électrique au claquage pour une structure P^+VN^+ sans limitation de la zone de charge d'espace (non tronquée).

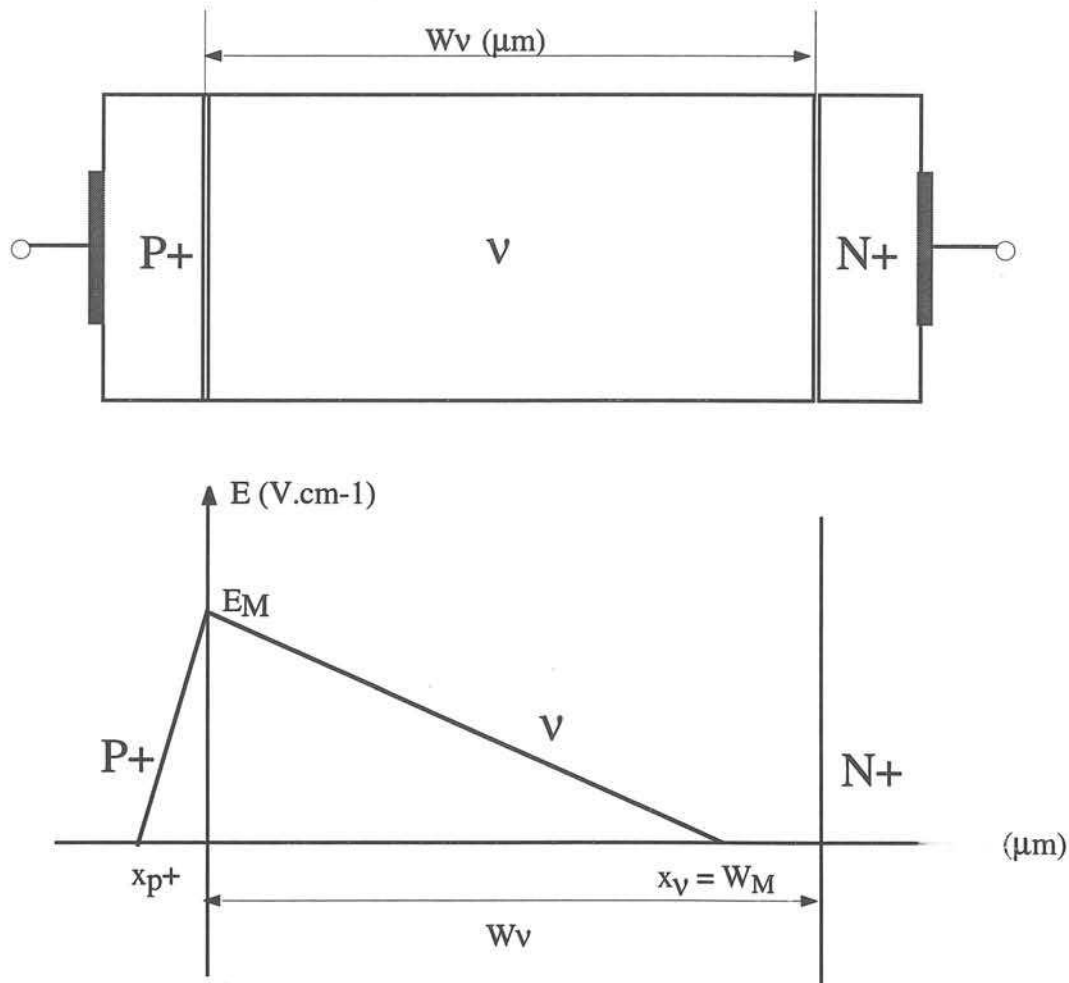


Figure 1.3 : Structure P^+VN^+ et profil du champ électrique au claquage cas d'une structure P^+VN^+ non tronquée ($W_V \geq x_V$)

Les équations (1.11) (1.12) permettent de calculer la valeur du champ maximal critique en fonction de la tension de claquage et du dopage N_V .

$$E_M = 700 BU^{-1/6} \quad (1.13)$$

où : E_M est le champ maximum au claquage (kV.cm^{-1}).

A titre d'exemple, pour $N_V = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ on obtient $E_M = 200 \text{ kV.cm}^{-1}$.

Il est utile de souligner ici pourquoi la tenue en tension impose au matériau d'avoir une résistivité élevée. En négligeant l'extension de la zone de charge d'espace dans la région très dopée P^+ , la tension de claquage est représentée par la surface du triangle rectangle déterminée par :

- le champ maximum situé au voisinage de la jonction métallurgique sur un côté du triangle, l'axe vertical,
- la largeur de la zone de charge d'espace définie par l'intersection de la droite de pente dE / dx donnée par le dopage du matériau (densité de charge supposée constante), avec l'axe horizontal (autre côté du triangle sur lequel est portée la largeur réelle de la zone de charge d'espace (voir figure 1.3).

Si la pente est très forte (cas des dopages élevés), la largeur de base définie par la droite est faible, la surface est trop petite pour représenter une tension élevée. Si la pente est faible (cas des faibles dopages), la largeur de base est grande, la surface est alors capable de représenter une tenue en tension élevée. Il est clair que l'effet de pente est plus important que celui de champ maximum qui ne varie que très peu.

En résumé la tension de claquage varie comme $(dE / dx)^{-1} E_M^2$ où $dE / dx = qN_V / \epsilon_{Si}$. Si le dopage est divisé par deux, dE / dx l'est aussi, mais E_M n'est que peu réduit. Le champ maximum E_M bouge très modérément tout en augmentant cependant avec le dopage (E_M évolue de $1,7 \cdot 10^5$ à $2,3 \cdot 10^5 \text{ V.cm}^{-1}$ pour N_V allant de $2 \cdot 10^{13}$ à $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$).

La figure 1.4 développe deux situations types (extraits de [6]) pour deux différents dopages de la zone centrale dans le cas d'une structure de diode P^+VN^+ non tronquée auxquelles s'appliquent les raisonnements précédents.

Ici, nous avons remarqué qu'en gardant la largeur de la zone v constante, quand le dopage de la zone v augmente de $5 \cdot 10^{13}$ à $2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ la tenue en tension diminue de 2390 V à 850V. Dans ce cas, il est clair que cette répartition du champ et la zone de charge d'espace tenant la tension lorsque la largeur de la zone de charge d'espace permet au champ de s'étaler confortablement dans la zone v .

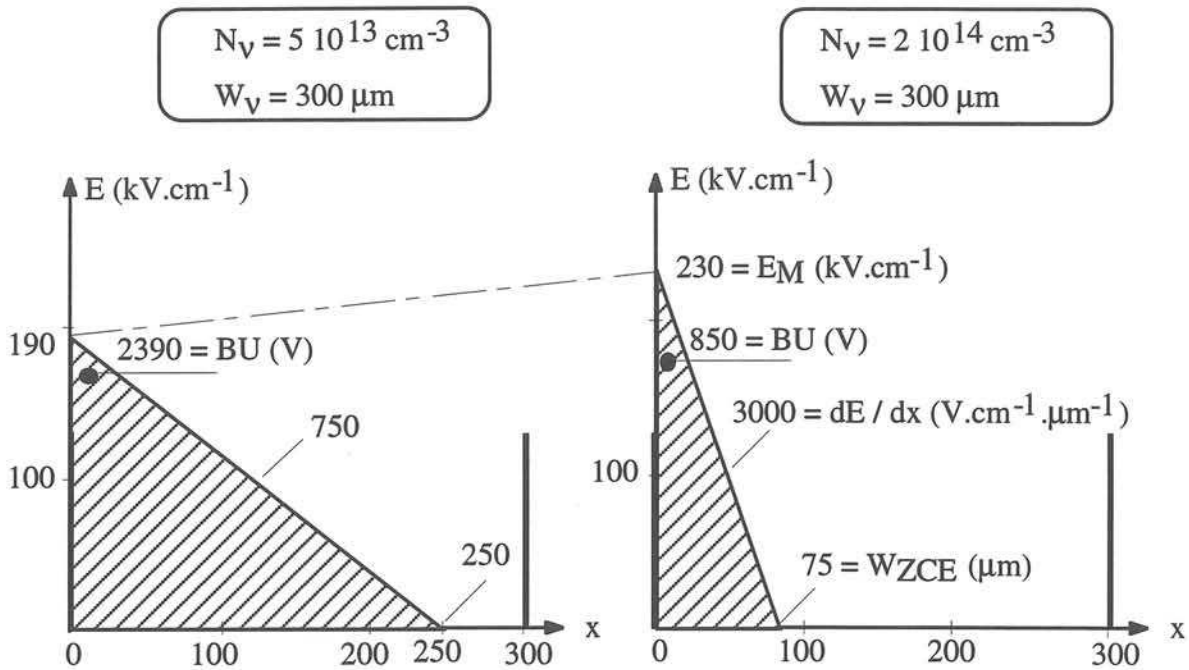


Figure 1.4 : Tension de claquage en fonction de la concentration de la zone centrale pour une diode P^+VN^+ non tronquée. Configuration de différentes zones de charge d'espace au moment du claquage (d'après J. ARNOULD et P. MERLE [6])

I.2.2 Jonction abrupte tronquée

La plupart des diodes et transistors utilisés fonctionnent en limitation de zone de charge d'espace pour que la chute de tension à l'état passant soit la plus faible possible. Dans ce cas, il faut tronquer la zone de charge d'espace maximale avec le coefficient de "troncature" défini par le rapport entre la largeur de la zone v effective et la largeur maximale non limitée: $\alpha = W_V / W_M$. Alors, le profil du champ électrique en fonction de x n'est plus "triangulaire" mais "trapézoïdal" si on néglige les extensions dans les zones très dopées comme le montre dans la figure 1.5.

D'après J. ARNOULD et P. MERLE [6], le calcul montre pour une structure P^+VN^+ qu'il faut tronquer de 25% la zone de charge d'espace maximale c'est à dire obtenir $W_V / W_M = 0,75$ afin d'avoir l'optimum. Pour cette configuration les équations (1.11) et (1.12) sont légèrement modifiées. Elles deviennent :

$$BU_{opt} = 4,22 \cdot 10^{13} (N_{V_{opt}})^{-3/4} \quad (1.14)$$

$$W_{V_{opt}} = 2,32 \cdot 10^{-6} (BU_{opt})^{7/6} \quad (1.15)$$

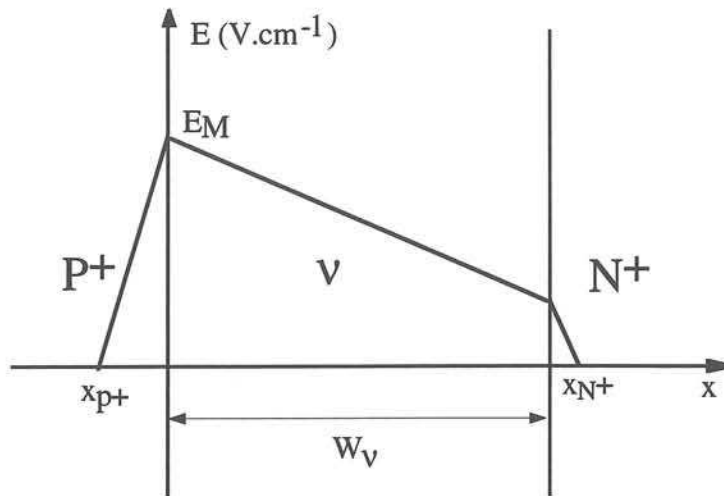


Figure 1.5 : Profil du champ électrique au claquage pour une structure P^+VN^+ en limitation de la zone de charge d'espace (tronquée)

A titre d'exemple, pour un dopage choisi $N_V \# 4,4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ soit $\rho = 100 \Omega.\text{cm}$ à l'aide des équations (1.14) et (1.15) nous avons trouvé la tension de claquage maximale en volume dans le cas "tronquage" optimum égale à 2500 V et $W_{V\text{opt}} \# 220 \mu\text{m}$.

Il est clair que pour une structure P^+VN^+ tronquée, la largeur de la zone centrale joue un rôle important sur la tenue en tension. La figure 1.6 présente deux exemples montrant la variation de la tension de claquage en fonction de la concentration et de la largeur de la zone centrale pour une diode P^+VN^+ tronquée.

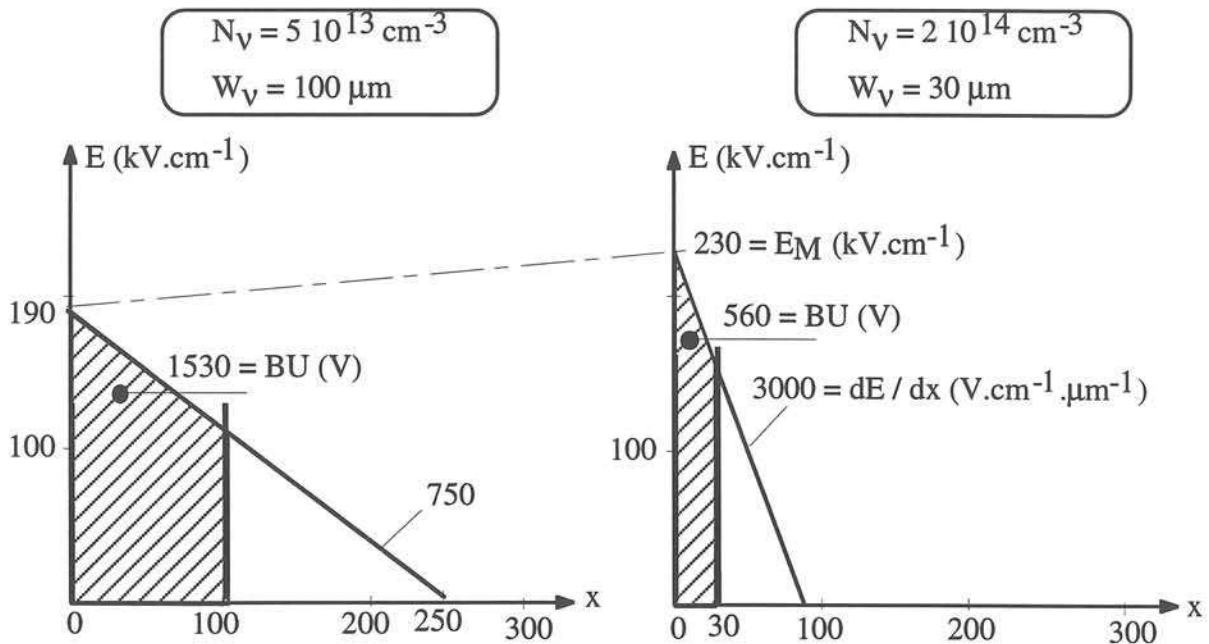


Figure 1.6 : Tension de claquage en fonction de la concentration et la largeur de la zone centrale pour une diode P^+VN^+ tronquée. Configuration de différentes zones de charge d'espace au moment de claquage (d'après J. ARNOULD et P. MERLE [6])

En plus, il est possible de calculer les caractéristiques de la zone de charge d'espace dans toutes les configuration possibles avec comme paramètre d'entrée la tension à tenir (annexe I.1) ou la résistivité de zone v (annexe I.2) [6].

En bref, pour une structure de diode PvN "simple" la tension de claquage est définie par le dopage de la zone centrale v et l'épaisseur de cette zone. Les courbes présentées dans la figure 1.7 données par J. ARNOULD et P. MERLE [6] résument le rôle des ces paramètres agissant sur la tension de claquage pour une diode PvN. Nous voyons que pour une épaisseur donnée, la tension de claquage approche une valeur constante lorsque le dopage décroît. Au contraire, lorsque, pour un dopage constant de la zone v on augmente son épaisseur la tension de claquage est limitée par la valeur du claquage de la jonction abrupte non tronquée P^+v (formule 1.10).

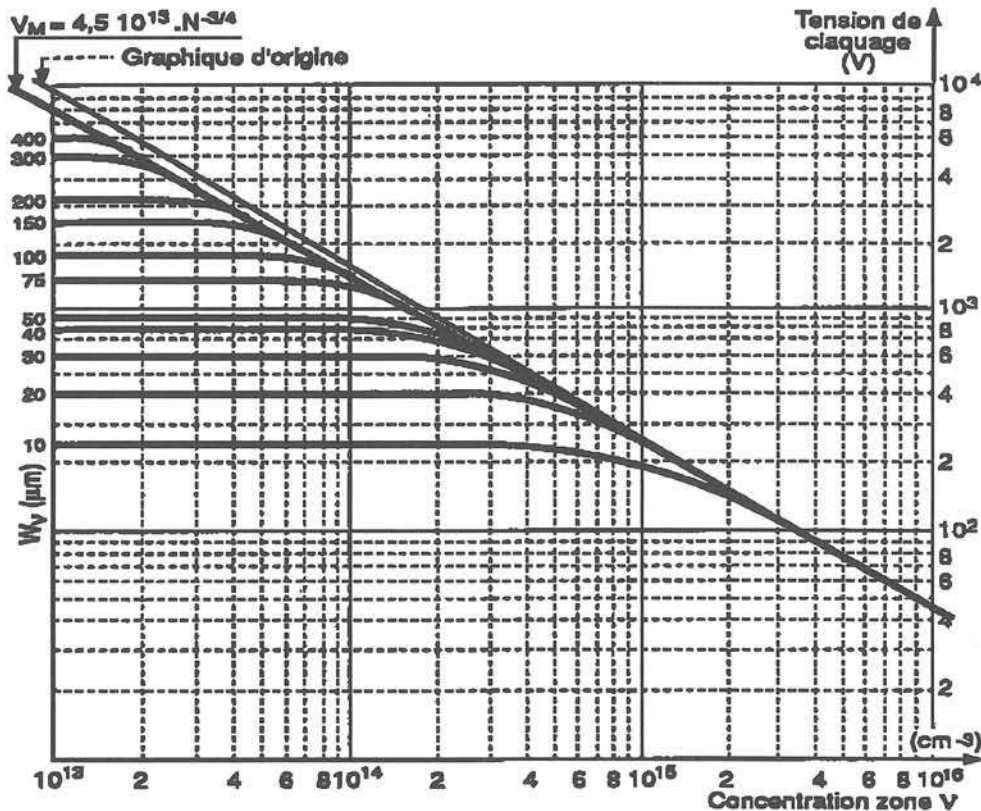


Figure 1.7 : Tension de claquage en fonction de la concentration et de l'épaisseur de la zone centrale pour une diode PvN (d'après J. ARNOULD et P. MERLE [6])

I.3 JONCTION PLANAR ET PROTECTION PERIPHERIQUE

I.3.1 Jonction planar

En technologie planar, une jonction peut être obtenue par diffusion des impuretés d'un type donné à travers une ouverture réalisée dans une couche d'oxyde en faisant le plus souvent

appel à un masque (figure 1.8b). Dans le cas qui nous intéresse, le matériau support appelé substrat est de type N et par conséquent la jonction est réalisée en effectuant par diffusion d'une zone P⁺. Ce processus de diffusion forme une courbure de jonction près du bord de masque. En examinant une jonction planar réelle, il apparaît que l'on peut en distinguer de trois types :

- plane
- cylindrique
- sphérique

Si les dimensions de la fenêtre de diffusion sont suffisamment grandes, la jonction peut être assimilée à un cylindre sous les bords et à une sphère sous les angles du masque (figure 1.8b).

Lorsque une tension en inverse est appliquée, les équipotentielles, parallèles le long de la partie plane, ont tendance à se rapprocher dans la courbure en provoquant une augmentation du champ électrique équivalent à l'effet de pointe.

Ce mécanisme diminue la tension de claquage par rapport à celle de la jonction plane infinie.

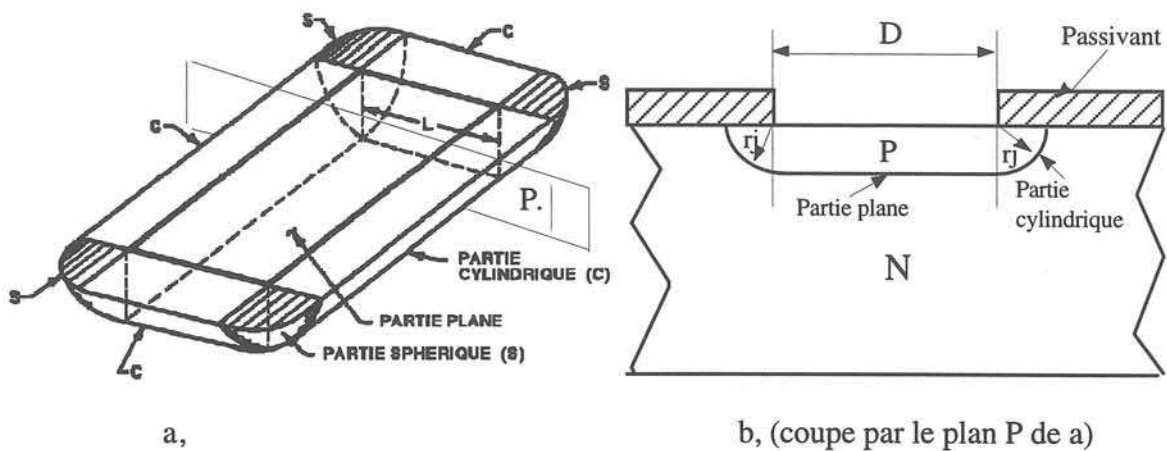


Figure 1.8 : Jonctions planars obtenues par ouverture de diffusion rectangulaire

L'influence du rayon de courbure sur la tenue en tension est étudiée par différents auteurs dans [12, 13, 14, 15]. La figure 1.9 montre des courbes de simulation obtenues par SZE et GIBBONS [12] représentant la tension de claquage en fonction du rayon de courbure r_j pour des jonctions abruptes cylindriques et sphériques en silicium.

Le claquage de la jonction plane est obtenu lorsque le rayon de courbure r_j tend vers l'infini. Une conclusion importante est que la tension de claquage augmente si le rayon de courbure r_j fait de même.

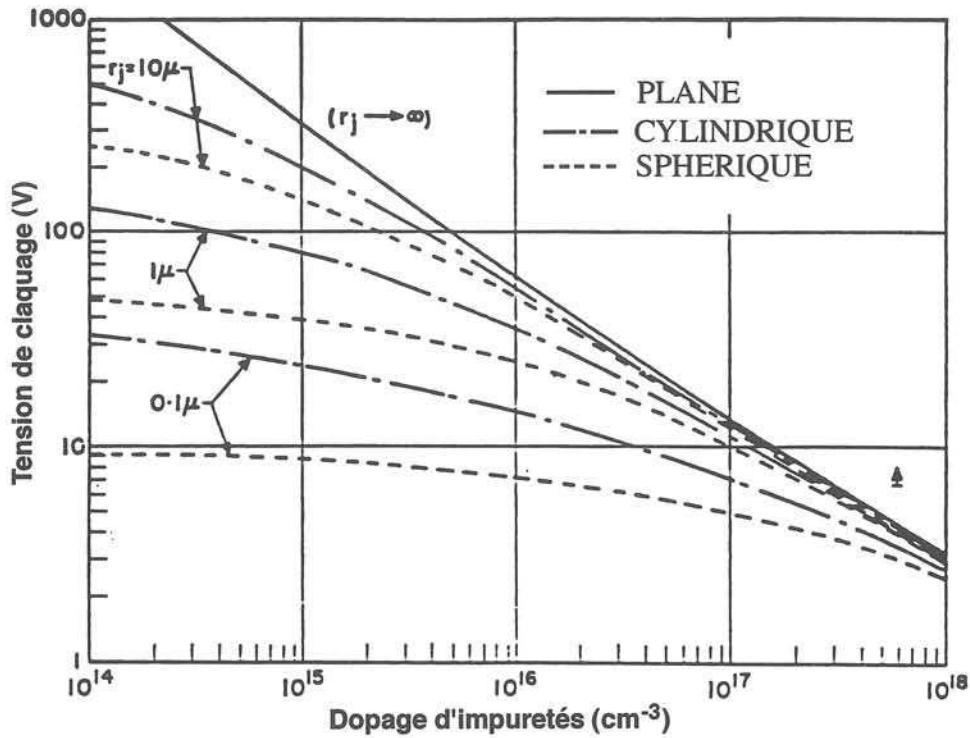


Figure 1.9 : Tension de claquage en fonction du dopage d'une jonction abrupte, cylindrique ou sphérique (d'après SZE [12])

I.3.2 Expressions analytiques pour le claquage des jonctions cylindriques et sphériques

Pour une jonction planar abrupte sans limitation de la zone de charge d'espace, l'équation de Poisson en coordonnées polaires s'écrit :

$$\frac{1}{r^n} \frac{d}{dr} (r^n \frac{dV}{dr}) = -\frac{1}{r^n} \frac{d}{dr} (r^n E) = -\frac{qN}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (1.16)$$

où: $n = 1$: jonction cylindrique

$n = 2$: jonction sphérique

Les calculs des tensions de claquage cylindriques BU_{cyl} et sphériques BU_{sph} sont détaillés dans [14]. Ces tensions de claquage sont normalisées par rapport à celle de la jonction plane sans limitation de zone de charge d'espace BU_p (équations 1.17) et (1.18).

Pour une jonction cylindrique:

$$\frac{BU_{cyl}}{BU_p} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{r_j}{W_c} \right)^2 + 2 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} \right] \ln \left[1 + 2 \left(\frac{W_c}{r_j} \right)^{8/7} \right] - \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} \quad (1.17)$$

Pour une jonction sphérique:

$$\frac{BU_{sph}}{BU_p} = \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^2 + 2,14 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{6/7} - \left[\left(\frac{r_j}{W_c} \right)^3 + 3 \left(\frac{r_j}{W_c} \right)^{13/7} \right]^{2/3} \quad (1.18)$$

où: r_j : rayon de courbure

W_C : largeur de la zone de charge d'espace au moment du claquage pour la jonction plane

D'après [14] ces relations analytiques donnent des résultats cohérents avec ceux ci obtenus par méthode numérique si le dopage N de la zone centrale reste inférieur à 10^{16} cm^{-3} et r_j/W_C inférieur à l'unité. En général, la tension de claquage de la jonction sphérique est 2 fois plus faible que celle de la jonction cylindrique.

Pour diminuer l'effet de pointe du champ électrique au niveau de la partie sphérique, les angles droits sont remplacés par des raccords circulaires lors de la conception des masques [3]. Cette solution élimine à peu près la possibilité d'avoir des jonctions sphériques et permet d'obéir aux conditions de claquage d'une jonction cylindrique.

Cependant, cette solution n'est efficace que si le rayon R de l'ouverture circulaire est suffisamment grand devant l'épaisseur maximale W_M de la zone de charge d'espace d'une jonction plane infinie .

I.3.3 Protection périphérique

Plusieurs techniques de protection périphérique (ou terminaison de champ comme on les appelle également) existent pour augmenter la tenue en tension d'une jonction planar. Leur but commun est de limiter l'intensité du champ électrique en périphérie en augmentant le rayon de courbure des équipotentielles par leur redistribution sur une grande surface latérale [6].

I.3.3.1 MESA

Pour les composants de puissance haute tension discrets avec les terminaisons de type MESA le problème de la tenue en tension est réglé en donnant à la structure un biseau selon un angle précis obtenu soit par un procédé chimique soit par un rodage mécanique. La figure 1.10 illustre l'exemple d'un angle aigu favorable et d'un angle obtus défavorable.

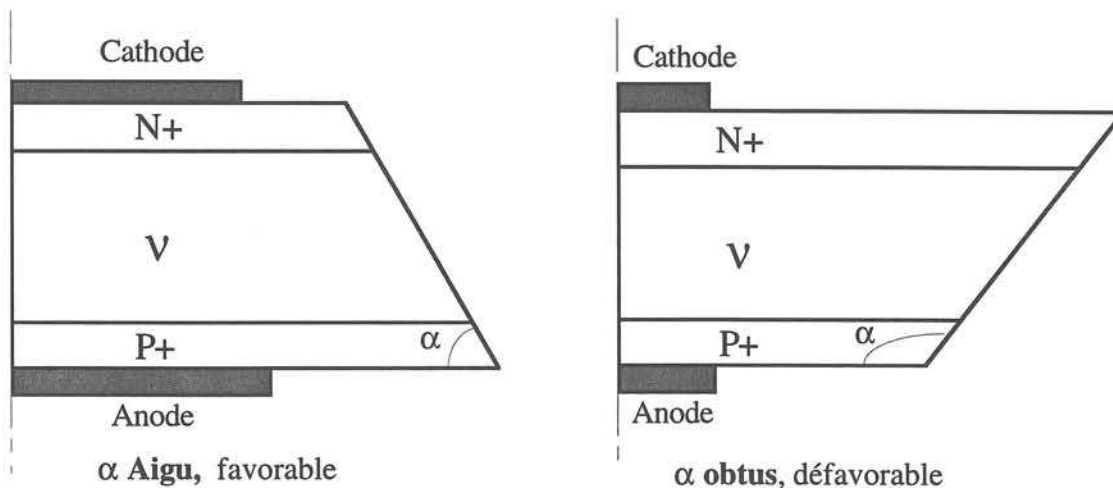


Figure 1.10: Terminaisons périphériques MESA

Le rôle des biseaux est d'élargir la zone de charge d'espace sur la surface latérale périphérique du composant pour réduire le champ électrique, et donc d'augmenter la tenue en tension périphérique au delà de celle de la tenue en tension plane interne [6].

La terminaison MESA permet d'obtenir des composants supportant des tensions proches de la tension de claquage en volume. Par contre, elle est délicate à réaliser sur un plan technologique, fragile (taux de rejet élevé dans certains cas) et ne permet pas de faire des mesures de test en cours de fabrication. De plus, elle n'est pas compatible avec la filière planar utilisée de plus en plus pour fabriquer de nouveaux composants de puissance de petites tailles ($12 \times 12 \text{ mm}^2$) tel que les transistors (MOS, IGBT) et à leur intégration.

Les protections périphériques compatibles avec la configuration planar les plus développées sont électrode de champ (EDC), anneaux de champ (ADC), couche semi-résistive (SIPOS), implantation de poche latérale (JTE). Ces protections sont toutes basées sur la nécessité d'étaler au mieux la charge d'espace générée par la jonction polarisée en inverse, afin de distribuer le potentiel sur la plus grande surface de silicium possible, et donc de diminuer son gradient, c'est-à-dire le champ électrique.

I.3.3.2 Electrode de champ (EDC)

Cette protection est souvent utilisée dans la gamme de basse tension (moins de 500V). Elle est simple de réalisation, lorsque l'on prolonge la plaque métallique constituant l'électrode métallique d'amenée de courant normale. En l'isolant du substrat par une couche d'oxyde à la périphérie de la jonction (figure 1.11), il est possible d'améliorer la répartition de charge d'espace et donc d'augmenter la tenue en tension périphérique [18].

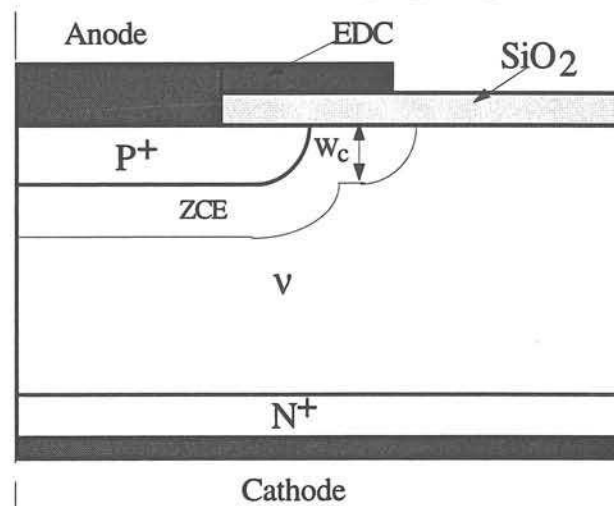


Figure 1.11 : Protection par l'électrode de champ

Les différentes études publiées [18, 19, 20, 21] montrent que pour un dopage de substrat donné, la longueur de l'électrode de champ ainsi que l'épaisseur d'oxyde situé sous cette électrode sont des paramètres influents. En effet, l'électrode de champ doit être

suffisamment longue pour agir sur la distribution du potentiel dans toute la région de charge d'espace. Pour un oxyde mince le claquage se produira à l'extrémité de la métallisation. Par contre, si l'on augmente son épaisseur de façon très importante, l'influence de l'électrode sera négligeable sur la charge d'espace et le claquage se produira au niveau de la courbure de jonction.

D'après F.CONTI and M.CONTI [18] et RUSU [20], le paramètre critique pour optimiser cette protection est le rapport entre l'épaisseur d'oxyde e_{OX} et l'extension de zone de charge d'espace sous l'oxyde W_C c'est-à-dire e_{OX} / W_C . Cette grandeur dépend du dopage de substrat. En général, pour un substrat donné il existe une épaisseur d'oxyde optimale qui permet d'avoir le claquage simultanément au niveau de la jonction et à l'extrémité de l'électrode de champ. D'après F.CONTI et M.CONTI [18] cette configuration est obtenue quand $e_{OX} / W_C = 0,07$ et d'après RUSU [20] $e_{OX} / W_C = 0,3$.

L'emploi de l'électrode de champ n'est intéressante que pour des dopages relativement élevés, et donc des tenues en tension assez faibles. Pour de faibles dopages l'épaisseur d'oxyde nécessaire pour atteindre la valeur de tension de claquage en volume dépasse les limites technologiquement acceptables. A titre d'exemple, pour un substrat de 10^{14} cm^{-3} on doit obtenir $e_{OX(opt)} = 8 \text{ } \mu\text{m}$. De plus, la présence de charges dans l'oxyde et sa qualité modifient l'effet de l'électrode de champ.

Une variante de la protection par électrode de champ consiste à réaliser un oxyde d'épaisseur variable. Ce type de terminaison permet d'assurer un effet dégressif de l'électrode de champ au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la jonction centrale. Cette variation de l'épaisseur de l'oxyde peut être réalisée en marches (figure 1.12a) ou de manière progressive, donnant alors un effet de biseau (figure 1.12b). Ces deux variantes ont été étudiées par [6] pour un oxyde "en marche" et par [36] pour l'oxyde en biseau. Il faut noter que sur le plan technologique l'une comme l'autre terminaison est très difficile à réaliser.

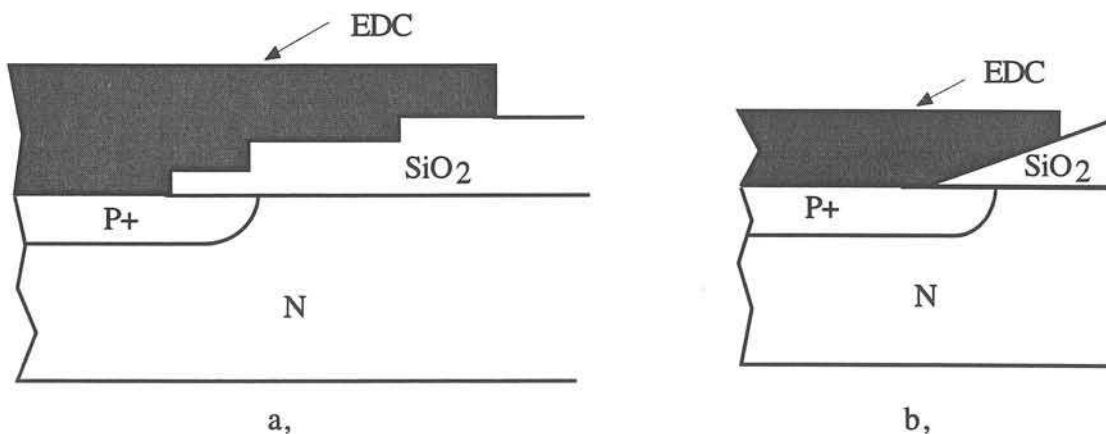


Figure 1.12 : Dispositifs avec électrode de champ sur épaisseur d'oxyde variable

I.3.3.3 Anneaux de champ

La protection par anneaux de champ a été proposée par KAO et WOLLEY en 1967 [22] puis complétée par une analyse bidimensionnelle par ADLER, TEMPLE, FERRO et RUSTAY en 1977 [23]. Elle consiste à faire diffuser à la périphérie un ou plusieurs, anneaux concentriques isolés les uns des autres, de même type que la jonction principale (figure 1.13).

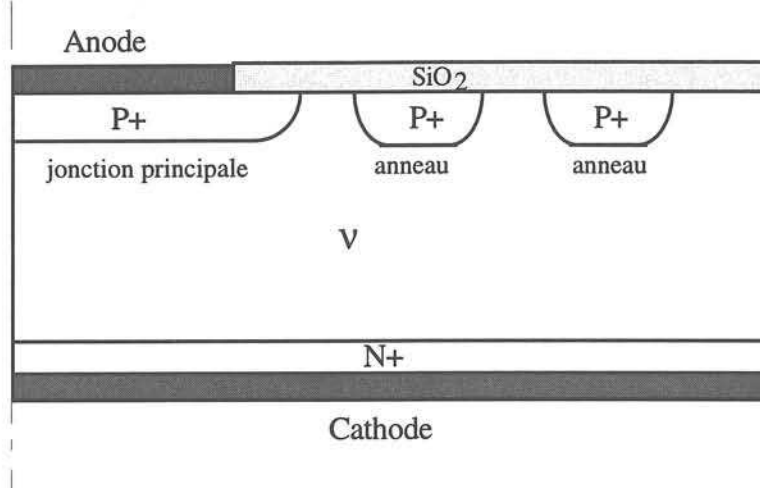


Figure 1.13 : Protection par anneaux de champ

L'avantage de cette technique est que les anneaux sont établis en même temps que la jonction principale, ce qui ne nécessite aucune étape technologique supplémentaire (de même que, comme déjà vu, celle des EDC sauf pour e_{ox} variable).

Le principe est basé sur un phénomène dynamique. Une tension inverse appliquée sur la jonction déplace la limite de la zone de charge d'espace de chaque anneau. Le potentiel aux bords de chaque anneau est modifié par division potentiométrique de la tension. Chaque anneau se comporte comme un translateur de tension et lorsqu'il y a plusieurs anneaux l'extension de charge d'espace est répartie sur l'ensemble de ces anneaux. Les équipotentielles sont repoussées par ces anneaux, donc elles les contournent, entraînant par là une augmentation du rayon de courbure et donc une amélioration de la tenue en tension périphérique.

Les paramètres principaux pour optimiser la tenue en tension sont la distance entre l'anode et le premier anneau, les distances entre les anneaux et leur nombre.

La distance optimale est celle pour laquelle le claquage se produit simultanément à la courbure maximale de la jonction principale et à la courbure maximale des tous les anneaux comme l'ont défini KAO et WOLLEY [22]. Cette distance optimale entre anode et anneau ou entre les anneaux reste cependant difficile à déterminer.

Les travaux complémentaires de BRIGIER et al. [24] et BOISSON [36] ont montré que les principaux paramètres influents pour déterminer la distance optimale entre les anneaux sont : dopage du substrat, rayon de courbure (c'est à dire la profondeur de diffusion $x_j P+$),

gradient de concentration des anneaux et densité de charges dans l'oxyde. YILMAZ [45] quant à lui, a montré l'influence néfaste des charges dans l'oxyde sur la tenue en tension. Lorsque le nombre de charge par unité de surface passe de 10^{11} cm^{-2} à $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, la tenue en tension du dispositif chute de 30%.

L'anneau de champ est souvent utilisé pour la gamme de tension inverse de l'ordre de 1000V à 1500V. Au delà, le nombre d'anneaux nécessaires devient trop important et demande une surface de silicium considérable [35, 36].

I.3.3.4 Couche semi - résistive (SIPOS)

Afin d'utiliser la plus grande surface de silicium possible pour répartir les équipotentielles on peut déposer en surface du composant une couche semi-résistive de type SIPOS (Semi Insulating POLycrystalline Silicon) soit directement sur le silicium soit, en interposant une couche tampon d'oxyde, qui agira comme une résistance de très forte valeur (figure 1.14).

Grâce à sa conductivité non nulle, il permet d'imposer une linéarisation du potentiel le long de la surface et donc d'augmenter la tension de claquage en surface [29, 35].

La couche SIPOS peut éliminer l'effet du champ fort du bout de l'électrode de champ, celui-ci étant l'inconvénient majeur de ce type de terminaison [35].

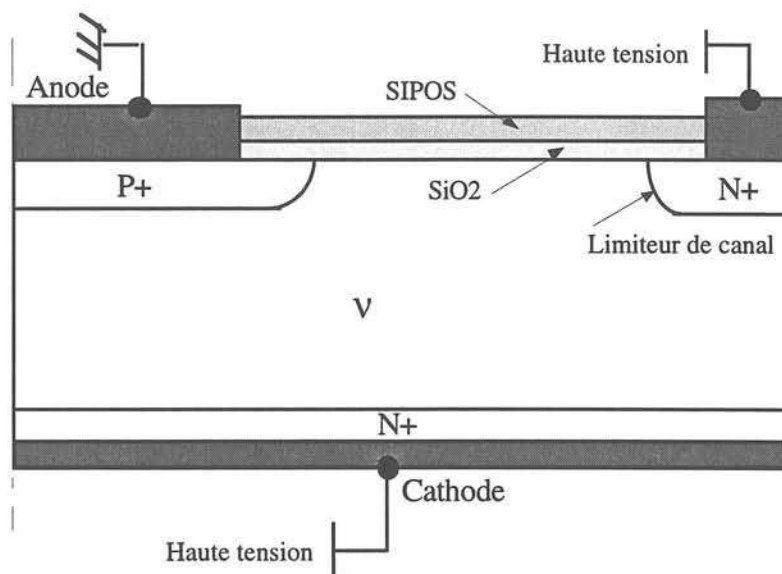


Figure 1.14 : Protection par SIPOS

I.3.3.5 Implantation latérale

Proposée par TEMPLE en 1976 [30], la protection par implantation latérale est tout à fait compatible avec la technologie planar. On procède par implantation d'une zone latérale faiblement dopée dite poche en périphérie, autour de la jonction principale. Cette poche est de même type que cette dernière (figure 1.15).

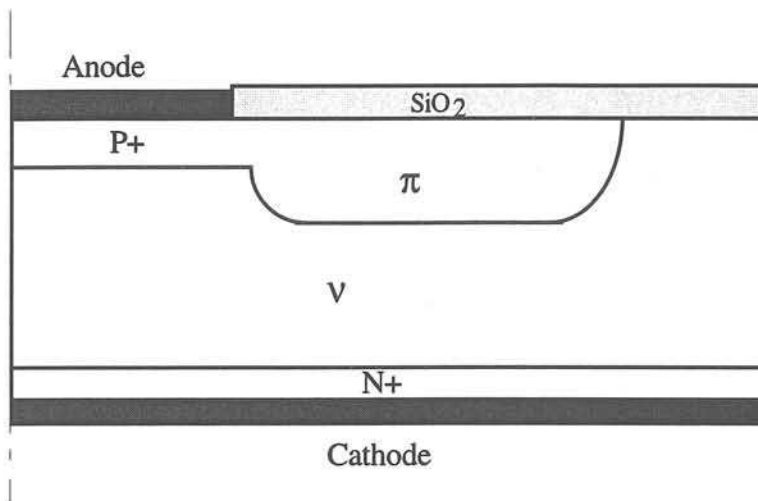


Figure 1.15 : Protection par poche

La poche impose à la zone de charge d'espace de s'étaler largement, latéralement, dans le silicium. La distribution du champ électrique est alors modifiée, les équipotentielles se répartissent plus largement et la tenue en tension est améliorée.

Cependant, afin d'obtenir le maximum de la tenue en tension du dispositif il est important pour ce type de protection d'optimiser certains paramètres comme: dose implantée, profondeur et longueur de poche ainsi que profondeur de la jonction principale. Différentes études [31, 32, 33, 34, 46] ont été effectuées dans ce domaine.

L'importance de l'optimisation de la dose implantée dans la poche a été montrée par des études de simulation et expérimentales par V.BOISSON dans [34], J.P.GOURRET dans [37] et J.L.SANCHEZ et G.CHARITAT dans [35].

Notons également que la protection périphérique par implantation de poche est aussi affectée par la présence de charges dans l'oxyde et à l'interface SiO_2/Si [31, 34]. Un mauvais oxyde, ayant une densité de charges en surface égale à 10^{12} cm^{-2} (du même ordre de grandeur que la dose implantée lors de la réalisation de la poche) entraîne des perturbations importantes sur la tenue en tension du dispositif.

Par rapport aux structures de protection par anneaux de champ, les poches donnent des tensions de claquage plus élevées. En effet, d'après [34] il faut quatre anneaux pour obtenir 90 % de la tension de claquage en volume et ceci, à condition d'une grande précision sur les distances entre les anneaux et les résistivités du substrat.

Les poches donnent des tensions de claquage supérieure à 90 % de la tension de claquage en volume lorsque la profondeur de la poche est grande. Mais en pratique, les diffusions très profondes et peu dopées ne sont pas simples à maîtriser, notamment à cause du phénomène d'exodiffusion des impuretés pendant le traitement thermique [1].

CONCLUSION DU CHAPITRE I

Nous avons présenté dans ce chapitre les mécanismes de claquage par avalanche et les calculs de la tension de claquage pour une jonction plane, notamment pour le cas des jonctions planars nous intéressant. Le point important à noter est que les calculs des intégrales d'ionisation à partir des coefficients (A_n , b_n) pour les électrons et (A_p , b_p) pour les trous proposés par les différents auteurs donnent des valeurs de tension de claquage différentes.

L'inconvénient le plus important des composants obtenus par la technologie planar est "l'effet de pointe" dû au rayon de courbure de la jonction, la réduction de la tension de claquage. Les calculs montrent qu'une augmentation de la tension de claquage est obtenue en accroissant ce rayon de courbure.

Ensuite, nous avons évoqué plusieurs techniques pour améliorer la tenue en tension en périphérie des structures planars. Toutefois aucune de ces techniques n'est universelle. On doit prendre en compte de nombreux paramètres comme : gamme de tension visée, surface occupée, complexité technologique de réalisation, sensibilité au processus de réalisation, adaptation au composant et difficulté de conception (simulation numérique 2D ou lois analytiques).

Les électrodes de champ ne conviennent pas pour les très hautes tensions (supérieures à 1000 V), mais la tendance actuelle consiste à les utiliser en complément d'anneaux de champ ou de couches semi - résistives.

L'essentiel des structures de protection périphérique est, à ce jour, réalisé à l'aide d'anneaux de champ. Cependant, ce procédé est très sensible aux paramètres physiques (dopage du substrat, charges dans l'oxyde) et aux dimensions des anneaux. Pour obtenir de fortes valeurs de tension de claquage (dépassant 1500 V) il faut augmenter le nombre d'anneaux et optimiser avec une grande précision les distances les séparant.

La poche semble être très performante pour réaliser des composants haute tension (supérieure à 2000 V). Elle permet de tenir la même tension que des anneaux de champ avec une largeur de terminaison deux fois plus faible. Cependant, pour que cette périphérie joue pleinement son rôle de protection, il fallait optimiser ses paramètres dont, surtout, la dose active. Le travail présenté dans les chapitres suivants a ce thème pour objet.

CHAPITRE II

Chapitre II

ETUDE ET OPTIMISATION D'UNE PERIPHERIE PLANAR MONOPOCHE HAUTE TENSION

INTRODUCTION

Si les composants à grille isolée ont depuis leur origine été utilisés dans des applications basse tension, l'évolution actuelle des caractéristiques électriques des IGBT leur ouvre des domaines haute tension pouvant atteindre plusieurs kilovolts [6]. Au vu des techniques d'assemblages et des dimensions (12 mm x 12 mm) de ces composants, seule la conception d'une périphérie PLANAR est raisonnablement envisageable.

L'essentiel des structures périphériques est, à ce jour, réalisé à l'aide d'anneaux de gardes. Cependant, pour des tensions dépassant 2 kV, les périphéries PLANAR en poche semblent présenter plus de robustesse et de fiabilité.

Si, lors de la conception d'un composant, le calibre tension souhaité permet de déterminer la résistivité du substrat et son épaisseur, une périphérie PLANAR cohérente avec les performances en volume du substrat nécessite une étude spécifique.

Comme toutes les terminaisons PLANAR, le principe de base de la périphérie en poche [31], [32], [34] consiste à redistribuer le potentiel sur une grande surface latérale du silicium, afin de se rapprocher de la tension de claquage de la jonction plane infinie [26].

Dans l'étude présentée, où le composant de test est une diode de puissance PIN, cette structure latérale implantée se situe autour de la jonction principale centrale. On diminue le dopage dans la région de la courbure maximale des équipotentiels et en surface, et donc le champ électrique dans ces zones. La tension de claquage obtenue dépend des dimensions et de la dose active de la poche.

Dans un premier temps, nous définirons la sensibilité de la tenue en tension de la périphérie planar monopoeche vis-à-vis de la dose implantée dans la poche par la simulation électrique bidimensionnelle en utilisant le module PISCES du logiciel ATLAS. A partir de cette étude, nous établirons la méthodologie pour déterminer une poche optimale. Ensuite, pour mieux comprendre le comportement d'une poche avec les différentes doses implantées, nous étudierons la distribution du champ électrique dans la structure de la périphérie en poche.

Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons aux autres paramètres ayant une influence sur la tenue en tension comme la longueur de la poche et la résistivité du substrat. Cette étude sera menée à l'aide du logiciel de simulation électrique et des dessins des motifs des lots repérés DPHT C1 et DPHT C2.

II.1 DIMENSIONNEMENT D'UNE PERIPHERIE PLANAR MONOPOCHE HAUTE TENSION

Le dimensionnement d'un composant de puissance débute par le choix du matériau de base et de ses caractéristiques [6]. Pour les composants "haute tension", comme ceux présentés dans le paragraphe §I.2, l'épaisseur de ce matériau est généralement suffisante pour accepter les contraintes mécaniques, la tranche initiale étant constituée d'un matériau homogène à haute résistivité.

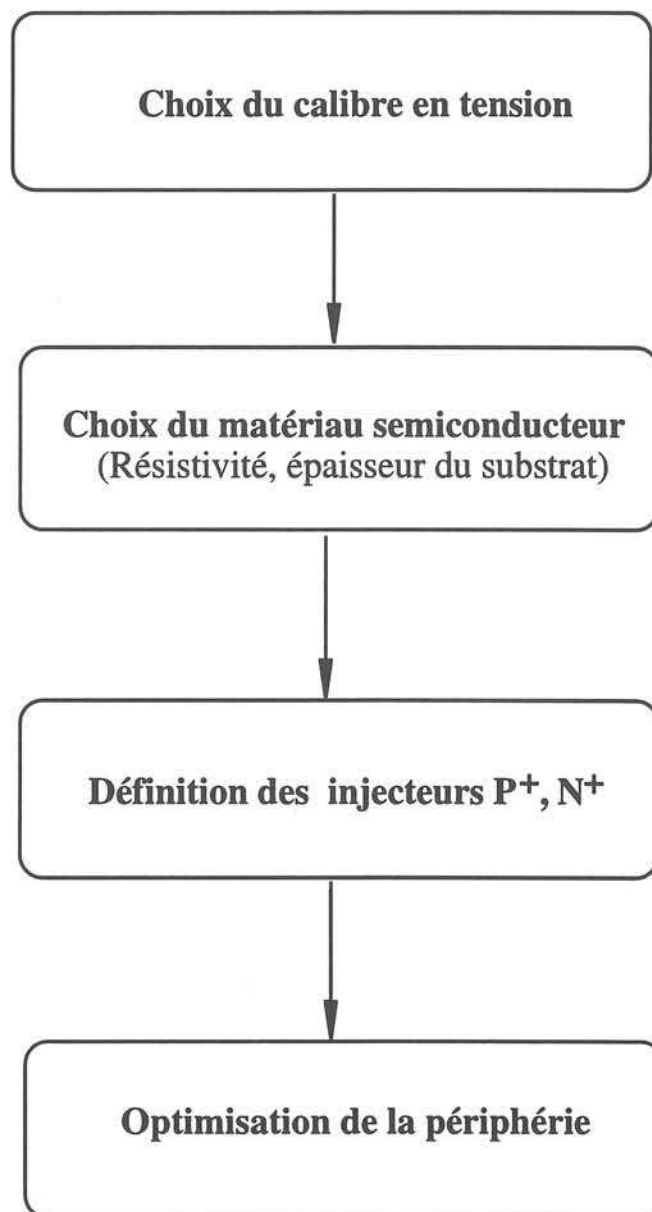


Figure 2.1 : *Dimensionnement d'une diode de puissance*

A titre d'exemple, nous allons expliciter cette démarche en déterminant les caractéristiques "optimales" d'une structure PIN de calibre en tension de 2500V.

Pour cette valeur, les calculs présentés dans §I.2.1 et développés dans [6] pour une jonction abrupte avec une zone de charge d'espace non tronquée, permettent de définir un substrat de type N (dopé au phosphore) ayant :

- une résistivité ρ_V égale à 100 $\Omega \cdot \text{cm}$
- une épaisseur W_V égale à 280 μm .

La conception des injecteurs P^+ et N^+ n'est pas cruciale pour les caractéristiques de tenue en tension du dispositif pour peu que l'on considère que leurs résistivités ρ_{P^+} et ρ_{N^+} sont très faibles par rapport à celle de la zone centrale ρ_V , comme cela est généralement le cas. Dans ces conditions, l'extension du champ électrique dans ces zones peut être négligée pour le calcul de la tenue en tension du dispositif. La seule restriction pouvant apparaître concerne l'épaisseur de ces injecteurs. En effet, il faudra veiller à s'assurer que le rabattement du champ est possible sans atteindre les extrémités P^+ et N^+ .

La dernière étape consiste à optimiser la protection périphérique. Le choix d'une type de protection doit être basé sur quelques critères essentiels, comme nous l'avons montré au chapitre I :

- calibre tension inverse désirée,
- surface silicium occupée et complexité technologique de réalisation.

Compte tenu de notre gamme de tension inverse souhaitée (dépassant 2000V), parmi les différentes terminaisons périphériques présentées au paragraphe § I.3.3 nous avons choisi d'étudier la périphérie en poche. Cette périphérie paraît mieux adaptée aux applications des hautes tensions que les autres.

Les dimensions principales de la périphérie monopoe avec ses paramètres représentatifs sont présentées dans la figure 2.2. Nous supposons dans l'ensemble de l'étude que les profils du dopage de la couche P^+ et de la poche π sont gaussiens. Pour la conception de la partie centrale, nous avons retenu :

- $r_{P^+} = 350 \mu\text{m}$
- $x_{jP^+} = 5 \mu\text{m}$
- $\Delta P^+\pi = 50 \mu\text{m}$

Ces 5 μm de jonction graduelle rajouteront un léger ΔU au claquage précédent.

On acceptera alors, pour cette jonction, dans sa version plane illimitée, un claquage d'environ 2700 V.

Une étude préliminaire [38] permet de retenir comme longueur de poche la valeur :

- $L_\pi = 500 \mu\text{m}$

- $e_{\text{nitrure}} = 1,5 \text{ } \mu\text{m}$
- $e_{\text{SiO}_2} = 1,5 \text{ } \mu\text{m}$
- $L_V = 400 \text{ } \mu\text{m}$

- $e_{\text{nitrure}} = 1,5 \text{ } \mu\text{m}$

- $e_{SiO_2} = 1,5 \text{ } \mu\text{m}$

- $L_V = 400 \text{ } \mu\text{m}$



Figure 2.2 : Dimensions principales d'une périphérie monopoché

II.2 COMPORTEMENT ELECTRIQUE BIDIMENSIONNEL DE LA PERIPHERIE PLANAR MONOPOCHE

Pour étudier le comportement électrique de la configuration précédente, on utilise le module PISCES du logiciel ATLAS de la société SILVACO. Le fichier d'entrée typique pour notre simulation est donné en Annexe II.1. Dans une première partie nous allons étudier par la simulation électrique bidimensionnelle l'influence de la dose implantée dans la poche sur la sensibilité de la tenue en tension. A partir des résultats obtenus, on peut envisager la poche optimale. Ensuite, nous allons étudier l'influence de la dose implantée sur la distribution du champ électrique dans la structure monopoché.

II.2.1 Présentation du logiciel ATLAS/PISCES

ATLAS est un logiciel basé sur la modélisation des phénomènes physiques dans les semiconducteurs. Il nous permet de simuler le comportement d'un composant à

semiconducteur et d'obtenir ses caractéristiques électriques en résolvant les équations de modélisation de celui-ci.

A partir des paramètres d'entrée, l'utilisateur peut imposer à la structure semiconductrice une excitation continue, alternative, ou un régime transitoire. Dans ces conditions, la simulation détermine le comportement interne de la structure et calcule dans tous les noeuds du maillage le champ électrique sur un élément linéique et la densité de courant pour un élément surfacique. Ces grandeurs locales permettent de tracer des équipotentiels et des lignes de courant.

L'ensemble de ces résultats est important pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ce logiciel peut être couplé avec le simulateur ATHENA/SUPREM. Ce dernier permet la modélisation et l'optimisation du processus de fabrication des dispositifs semiconducteurs. Mais pour notre simulation nous n'avons pas réussi à utiliser cette possibilité parce que le nombre de nœuds est limité.

Le logiciel ATLAS peut être utilisé pour la simulation de diverses familles de composants semiconducteurs (silicium, AsGa, matériaux polycristallins ou amorphes, etc...). Il est composé pour cela de plusieurs modules. Nous utiliserons dans cette étude le module PISCES appliqué aux composants silicium.

II.2.1.1 Module PISCES

La fonction essentielle de PISCES est de pouvoir prédire le comportement électrique d'un dispositif à partir du calcul du potentiel électrostatique et des concentrations des porteurs mobiles en chaque point de la structure. Pour cela, PISCES résoud de façon numérique les équations fondamentales des semiconducteurs [61] à savoir:

- l'équation de Poisson (2.1) reliant le potentiel électrostatique ψ à la densité de charge d'espace mobile et à la densité de charges fixes qui peuvent être présentés dans un matériau isolant.

$$\text{div}(\epsilon \vec{\nabla} \psi) = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) = F_\psi(\psi, n, p) \quad (2.1)$$

- l'équation de continuité des électrons (2.2) et des trous (2.3), liant les densités de courants à l'évolution des concentrations de porteurs en vérifiant le principe de la conservation de l'énergie.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n - U_n = F_n(\psi, n, p) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p - U_p = F_p(\psi, n, p) \quad (2.3)$$

Les densités de courants J_n et J_p dans les équations (2.2) et (2.3) sont constituées d'une partie relative à la diffusion $qD_n \vec{\nabla} n$ et $-qD_p \vec{\nabla} p$ et d'une partie relative au transport par champ électrique $qn\vec{E}\mu_n$ et $qp\vec{E}\mu_p$:

$$\vec{J}_n = qn\vec{E}\mu_n + qD_n \vec{\nabla} n \quad (2.4)$$

$$\vec{J}_p = qp\vec{E}\mu_p - qD_p \vec{\nabla} p \quad (2.5)$$

U_p et U_n sont respectivement les vitesses de recombinaison des trous et des électrons

Les trois fonctions inconnues à trouver sont le potentiel électrostatique $\psi(x, y, t)$ et les concentrations des électrons $n(x, y, t)$ et des trous $p(x, y, t)$.

Ce système n'admet pas de solution analytique générale, il faut donc pour le résoudre avec une précision acceptable passer par une approche numérique. L'utilisateur doit indiquer au module PISCES les domaines ou les régions sur lesquels seront calculés les équations, les différents modèles physiques à utiliser et les conditions aux limites incluant les conditions de polarisation.

II.2.1.2 Structure et maillage initial

La structure physique à simuler peut avoir une allure complètement arbitraire. Les différents matériaux (Si, Oxyde, Al, etc...), les électrodes, et les profils de dopage sont précisés directement par l'utilisateur ou bien à partir d'un simulateur de processus technologique tel que logiciel SUPREM3 ou ATHENA. Une combinaison de ces deux approches peut aussi être utilisée : certaines parties de la structure peuvent être définies par l'utilisateur, et d'autres issues des résultats de simulation technologique.

Les équations aux dérivées partielles sont discrétisées à l'aide d'un maillage triangulaire dont les directives sont spécifiées par l'utilisateur. PISCES résout les équations du semiconducteur sur un maillage triangulaire non uniforme en utilisant la méthode des éléments finis.

La réalisation du maillage est une tâche particulièrement critique car son choix a un impact direct sur la rapidité et la convergence des calculs ainsi que sur la précision des résultats. Elle consiste à diviser la structure en lignes parallèles généralement non régulièrement espacées, et cela dans les deux directions x et y . Il est important d'établir un maillage en accord avec la structure et en respectant un nombre maximal de noeuds imposé par le simulateur. Cette cohérence passe par un maillage fin dans la région à fortes variations en concentration de porteurs (jonctions P^+/π ou π/v , interface SiO_2/Si , etc...) et un maillage moins serré dans les régions où le dopage varie faiblement. Cependant, les longueurs de maille doivent suivre une progression géométrique pour ne pas induire des problèmes de

convergence lors de la simulation. L'augmentation du nombre des noeuds du maillage procure bien sûr une meilleure précision, mais s'accompagne d'une augmentation du temps de calcul et de la place mémoire occupée. Il est donc nécessaire de trouver le bon compromis entre le temps et de la précision de calcul.

La figure 2.3 représente en 1D les profils de dopage de la poche π et de la couche P^+ , là même ceux que l'on introduit dans ATLAS.

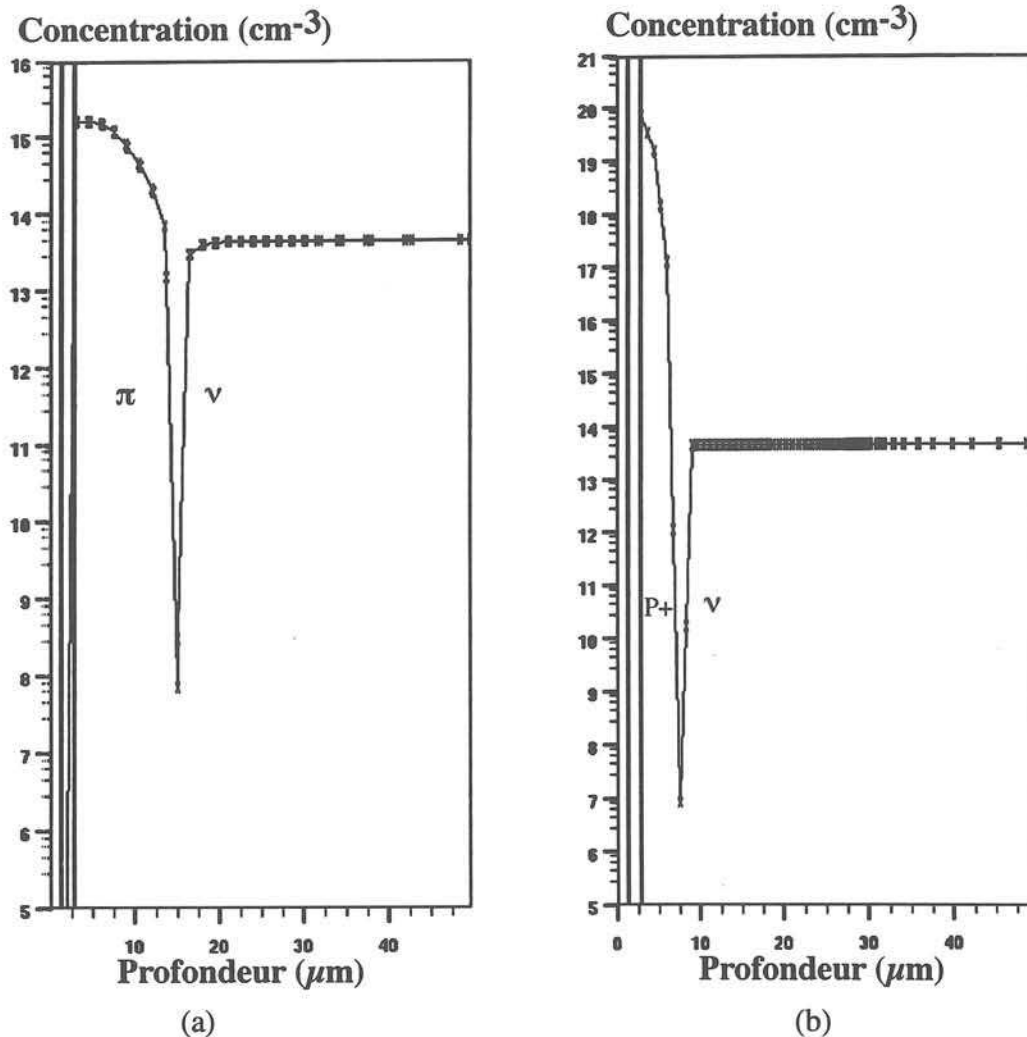


Figure 2.3 : Profils de dopage de la structure monopoché, courbe (a) : pour la poche π (b) : pour couche P^+

II.2.1.3 Modèles physiques

Une fois la structure est définie, la première tâche à réaliser par le logiciel consiste à résoudre les équations fondamentales des semiconducteurs, afin de déterminer la valeur du potentiel électrostatique ψ et des concentrations en électrons (n) et en trous (p). A ce niveau, il est nécessaire de spécifier dans l'algorithme de la simulation les modèles et les paramètres physiques les mieux adaptés à la structure étudiée car la précision de la simulation dépend de

nombreux modèles physiques régissant les lois de la recombinaison, de la mobilité et de la durée de vie des porteurs.

Le logiciel PISCES contient un grand nombre de modèles physiques applicables aux structures semiconductrices. Pour nos simulations nous utilisons certains modèles proposés par “défaut”, pour d’autres nous allons choisir les mieux adaptés ou les modifier selon le type de structure et la simulation à réaliser. Au programme dédié au calcul de la tension de claquage, nous utilisons les modèles suivant pour :

1. **La mobilité:** “FLDMOB” spécifiant que la mobilité des porteurs varie en fonction de la composante parallèle du champ électrique selon les relations:

$$\mu_n(E) = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_0 E}{V_{sat}} \right)^\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \mu_0 \quad \text{avec } \beta = 2 \quad (2.6)$$

$$\mu_p(E) = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu_0 E}{V_{sat}} \right)^\beta} \right]^{\frac{1}{\beta}} \mu_0 \quad \text{avec } \beta = 1 \quad (2.7)$$

où : • μ_0 est la mobilité à faible valeur de champ:

pour les électrons : $\mu_{n0} = 1500 - 1400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$

pour les trous : $\mu_{p0} = 500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

• V_{sat} est la vitesse de saturation des porteurs dans le silicium qui dépend de la température

$$V_{sat}(T) = \frac{2,4 \times 10^7}{1 + 0,8 \exp\left(\frac{T}{600}\right)} \quad (\text{cm s}^{-1}) \quad (2.8)$$

2. **La recombinaison :** nous utilisons les modèles de la recombinaison Shockley Read Hall (SRH) et la recombinaison Auger.

• *modèle SRH:*

$$U_{SRH} = \frac{pn - n_i^2}{\tau_p \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{KT}\right) \right] + \tau_n \left[p + n_i \exp\left(\frac{E_i - E_t}{KT}\right) \right]} \quad (2.9)$$

où : • E_t est le niveau d’énergie situé dans la bande interdite et associé au défaut recombinant

- τ_n et τ_p sont les durées de vie des électrons et des trous. Elles dépendent de la concentration suivant les lois :

$$\tau_n(x, y) = \frac{\tau_{n0}}{1 + N(x, y) / N_{SHR-n}} \quad (2.10)$$

$$\tau_p(x, y) = \frac{\tau_{p0}}{1 + N(x, y) / N_{SHR-p}} \quad (2.11)$$

où :

- $N(x, y)$ est la concentration locale d'impureté,
- N_{SHR-n} , N_{SHR-p} , τ_{n0} , τ_{p0} sont des constantes données par le logiciel par défaut (ils peuvent être modifiés)

Pour le silicium : • $N_{SHR-n} = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_{SHR-p} = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,
• $\tau_{n0} = 10^{-5} \text{ s}$, $\tau_{p0} = 10^{-5} \text{ s}$.

- *modèle AUGER*: selon le modèle, le taux de recombinaison est donné par :

$$U_{Auger} = c_n(pn^2 - nn_i^2) + c_p(np^2 - pn_i^2) \quad (2.12)$$

où :

- c_n , c_p sont les coefficients de capture de trous et d'électrons. Ils sont constants et donnés par le logiciel par défaut.

Pour le silicium : - $c_n = 8,3 \cdot 10^{-32} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$, $c_p = 1,8 \cdot 10^{-31} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$

3 - Ionisation par impacte : Le modèle de Selberherr considère un taux de génération de paires électron et trou par ionisation donné par la relation suivant :

$$G = \alpha_n \frac{|J_n|}{q} + \alpha_p \frac{|J_p|}{q} \quad (2.13)$$

où :

- α_n et α_p sont les coefficients d'ionisation (§I.1.2).

Les valeurs des coefficients A_n , b_n , A_p , b_p , fixées par défaut par PISCES [61] pour le silicium sont :

- $A_n = 7,03 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-1}$
- $b_n = 1,23 \cdot 10^6 \text{ V.cm}^{-1}$
- $A_p = 1,58 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-1}$
- $b_p = 2,036 \cdot 10^6 \text{ V.cm}^{-1}$

Comme tout logiciel écrit pour résoudre les équations aux dérivées partielles il faut indiquer les conditions aux limites sur une frontière d'un domaine fermé.

ATLAS contient quatre principales conditions aux limites pour 4 types de frontières :

- Condition de DIRICHLET pour le contact ohmique : le potentiel, les concentrations des électrons et des trous en surface sont fixés. Le potentiel Fermi des électrons et des trous est égal à la tension appliquée $\Phi_n = \Phi_p = V_{app}$

- Condition de NEUMANN : la dérivée normale du champ électrique est nulle sur la frontière en l'absence de charge surfacique.

- Contact Schottky: le potentiel de surface d'un contact Schottky est défini par

$$\psi_s = \chi + \frac{E_g}{2q} + \frac{kT}{2q} \ln \frac{N_c}{N_v} - \phi_m + V_{app} \quad (2.14)$$

où : - χ est l'affinité électrique

- Φ_m est la hauteur de barrière métal - semiconducteur

- E_g est l'énergie de la bande interdite

- N_c, N_v sont les densités d'états équivalents des bandes de conduction et de valence.

- U_{app} est la tension extérieure appliquée

- Contact entre un semiconducteur et un isolant : dans ce cas la concentration d'électron et de trou est forcée à une valeur nulle au niveau du contact $n_s = p_s = 0$

Les résultats des simulations peuvent être obtenus sous forme de tableaux de valeur (tension, courant, concentration...) ou sous forme de graphiques :

- à une dimension suivant une coupe dans la structure : profil de dopage, potentiel, champ, concentration, densité de courant, etc...

- à deux dimensions : maillage, localisation des jonctions, des électrodes, contour des lignes équipotentiels, contour des lignes isovaleurs du champ électrique.

Tension de claquage :

La tension de claquage est obtenue par approximation successives en faisant varier la polarisation appliquée jusqu'à ce que l'intégrale d'ionisation des électrons ou des trous le long d'une ligne de champ soit égale à l'unité. Pour une polarisation donnée, le programme calcule les intégrales d'ionisation pour les électrons et pour les trous sur toutes les lignes de champ et donne la valeur maximale ainsi que sa position.

II.2.2 Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de l'implantation de la poche

Le paramètre important pour la tenue en tension de la périphérie monopoe est, comme l'ont montré les publications [36, 43], la dose active de la poche π .

En effet, d'après [37], pour exprimer la relation entre les charges actives et le champ électrique dans la poche on peut utiliser le théorème de Gauss. D'après ce théorème, le flux du vecteur champ électrique à travers une surface fermée est égal à la somme des charges présentes à l'intérieur de cette surface. Si on l'utilise pour une jonction P-N du côté P on peut écrire :

$$\int_S \vec{E} \cdot \vec{n} ds = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0} \int_V Q(v) dv \quad (2.15)$$

où : • $Q(v)$ en $C.cm^{-3}$ est la quantité de charge par unité de volume dans la région de la zone de charge d'espace du côté P.

• S : dans notre cas nous choisissons S comme la surface dont deux côtés sont perpendiculaires à la jonction. Le troisième côté est situé sur la limite de la zone de charge d'espace où le champ est nul, et le quatrième est confondu avec la jonction où le champ est maximum.

Pour un problème unidimensionnel la relation (2.15) s'écrit :

$$E_{max} = \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0 A} \int_V Q(v) dv \quad (2.16)$$

Expression dans laquelle A représente la surface de la jonction. Lorsque le problème est de nature bidimensionnelle, le champ électrique n'est pas perpendiculaire à la jonction et dans ce cas la relation (2.16) s'écrit:

$$E_{max} \leq \frac{1}{\epsilon_r \epsilon_0 A} \int_V Q(v) dv \quad (2.17)$$

Dans le silicium, la valeur du champ électrique critique conduisant à l'avalanche est de l'ordre de $2 \cdot 10^5 V.cm^{-1}$. Ainsi, d'après la relation (2.17), si l'on plante une charge uniforme Q^*_O de $1,3 \cdot 10^{12} cm^{-2}$ sur la surface du dispositif, il est possible de maintenir le champ électrique en dessous de sa valeur critique. Cependant, il y a toujours des charges dans la couche d'oxyde au dessus de la poche alors les charges actives de la poche peuvent être estimées de 0,6 à 0,8 de Q_O^* .

Cette relation démontrée au moyen du théorème de Gauss, n'est pas valable lorsque le processus d'avalanche ou tout autre mécanisme engendrant des courants est déclenché dans la région de charge d'espace. Alors, une approche numérique pour résoudre les équations fondamentales des semiconducteurs est plus convenable.

Pour définir la dose active optimale de la poche π qui permettra d'obtenir la tension de claquage la plus élevée on utilise le logiciel de simulation bidimensionnelle ATLAS/PISCES.

Cette démarche est effectuée en définissant :

- une variable primaire : la dose active de la poche π (Q^*_π) (cm^{-2})
- une variable secondaire : la profondeur de la poche π/v ($x_{j\pi}$) (μm)

Pour l'ensemble de l'étude nous considérons que les profils du dopage de la couche P^+ et de la poche π sont gaussiens (figure 2.4).

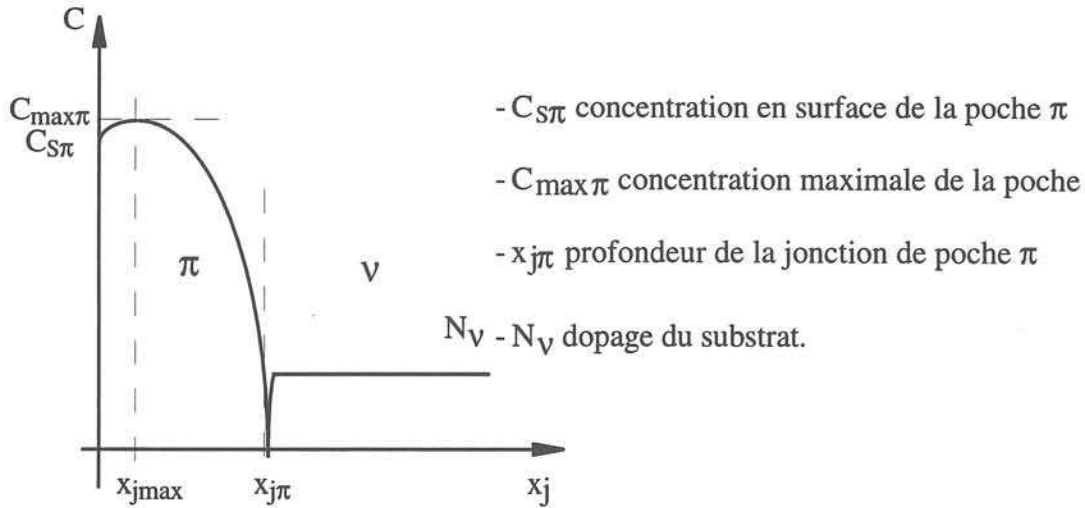


Figure 2.4 : Profil Gaussien de la poche π (présenté sous forme du log de la concentration)

La dose active de la poche π est définie de manière approchée [1] par la formule

$$Q^*_\pi \approx \frac{C_{\max\pi} (x_{j\pi} - x_{j\max}) \sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln\left(\frac{C_{\max\pi}}{N_V}\right)}} + C_{S\pi} x_{j\max} \approx \frac{C_{S\pi} x_{j\pi} \sqrt{\pi}}{2\sqrt{\ln\left(\frac{C_{S\pi}}{N_V}\right)}} \quad (2.18)$$

Pour faire varier Q^*_π on peut jouer, soit sur la concentration en surface ($C_{S\pi}$), soit sur la profondeur de la jonction de poche ($x_{j\pi}$) en maintenant constante l'autre variable. Pour dissocier les effets nous avons étudié la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active pour plusieurs valeurs de profondeur de jonction. $C_{S\pi}$ prend alors la valeur adhoc rendant compte du profil Gaussien de l'hypothèse initiale.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans les six tableaux de l'annexe II.2 et une représentation graphique du réseau $BU = f(Q^*\pi)$ à $x_{j\pi} = \text{cte}$ est donnée sur figure 2.5

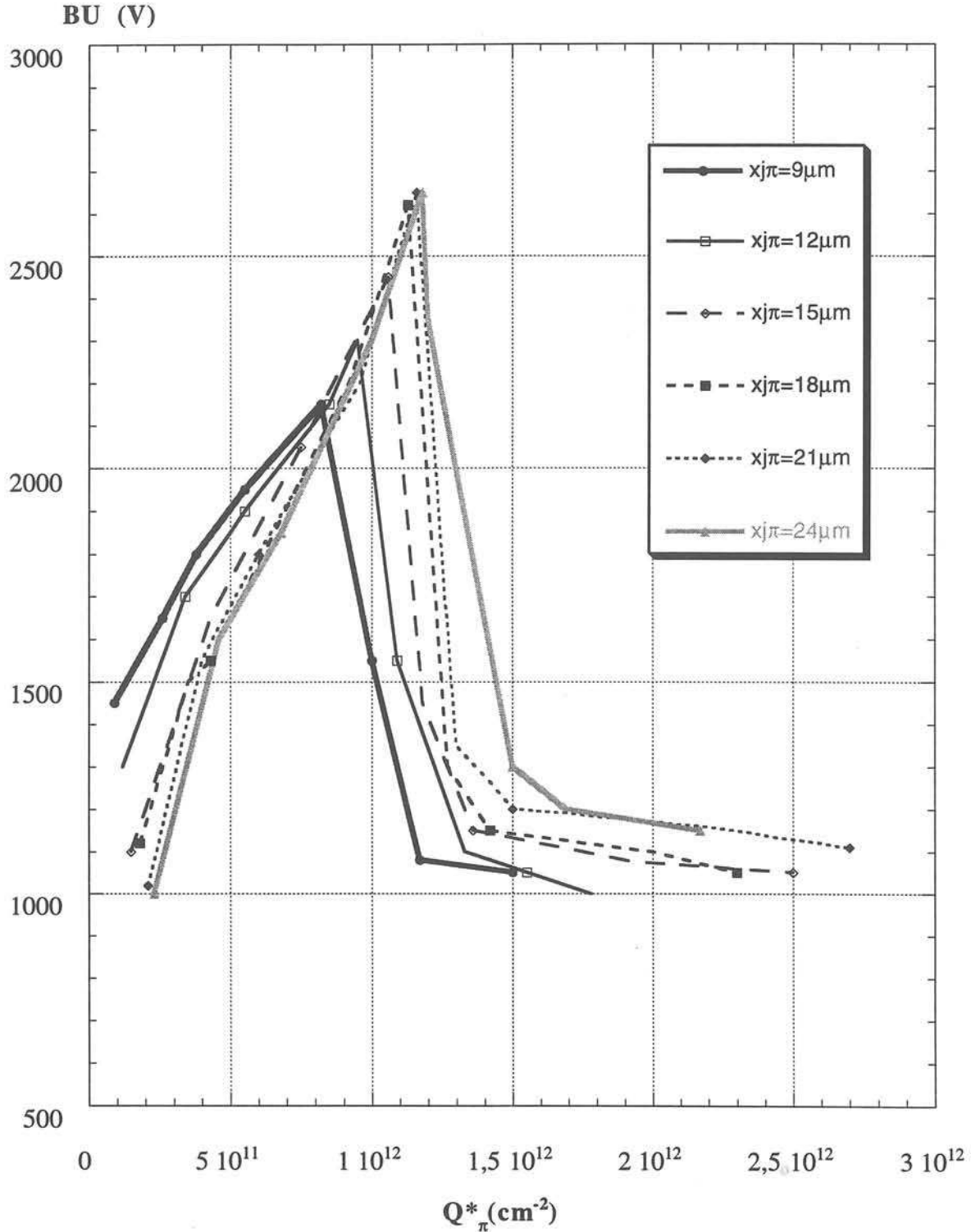


Figure 2.5 : Tracé (en simulation) du réseau $BU = f(Q^*\pi)$ à $x_{j\pi} = \text{cte}$ pour un substrat $100 \Omega \cdot \text{cm}$, type N.

N.B : Les résultats simulés pour les tensions de claquage sont donnés avec une incertitude de $\pm 50V$ étant donné que la sauvegarde des fichiers de sortie se fait de façon discrète tous les 50 V à partir de la valeur 1200 V pour la tension inverse appliquée.

A partir des résultats de simulation obtenus (figure 2.5), plusieurs remarques peuvent être dégagées quant à la sensibilité de la tenue en tension des terminaisons périphériques monopoches vis à vis de la dose active de cette dernière:

1- Pour les doses proches de l'optimum, l'augmentation de la profondeur de la jonction de poche ($x_j\pi$) entraîne celle de la tenue en tension de la périphérie. Ce phénomène peut être probablement expliqué par la raison suivante: plus la profondeur de diffusion augmente, plus le gradient de dopage dans cette région devient faible et plus la tension de claquage est élevée. Noter que pour des doses relativement inférieures à l'optimum la tendance est inverse, c'est à dire, il y a avantage à avoir des $x_j\pi$ faibles.

2- Pour un substrat donné, on constate qu'il existe, pour chaque profondeur de jonction de la poche ($x_j\pi$), une dose active optimale ($Q^*_{\pi opt}$), correspondant à la tenue en tension maximale de la périphérie.

3- Une discontinuité de fonctionnement apparaît pour la dose optimale $Q^*_{\pi opt}$. Si ce point correspond à la tenue en tension maximale du composant, il ne peut être en revanche considéré mathématiquement comme un maximum de la fonction $BU = f(Q^*\pi)$. Il s'agit, physiquement, d'un changement de mécanisme de claquage comme on va le voir plus loin.

A partir de la figure 2.5 donnant le réseau de caractéristiques de la tenue en tension obtenue pour le substrat choisi (100 $\Omega.cm$, type N) on remarque que les six courbes tracées passent chacune par une dose active optimale $Q^*_{\pi opt}$ différente correspondant à la tenue en tension maximale pour la profondeur de poche considérée. Autrement dit, le couple des deux valeurs BU_{max} et $Q^*_{\pi opt}$ varie en fonction de la profondeur de poche π . On peut en extraire les courbes de la dose active optimale de la poche $Q^*_{\pi opt}$ (figure 2.6) et de sa tension de claquage maximale BU_{max} en fonction de sa profondeur $x_j\pi$ (figure 2.7).

Comme le montre la figure 2.7, pour une structure optimale, l'influence de la profondeur de poche sur la tenue en tension de la structure est limitée. Pour le substrat 100 $\Omega.cm$ type N celle-ci augmente en même temps que la profondeur $x_j\pi$ jusqu'à la valeur 21 μm . Au delà, il n'y a plus d'accroissement de la tension de claquage. Pour une profondeur de poche de 21 μm ou plus, la tension de claquage prévue par simulation atteint presque, avec 2650 V, la valeur obtenue dans le cas d'une jonction plane infinie sur substrat 100 $\Omega.cm$ type N, c'est à dire 2700 V. Les caractéristiques physiques du silicium sont alors pleinement utilisées.

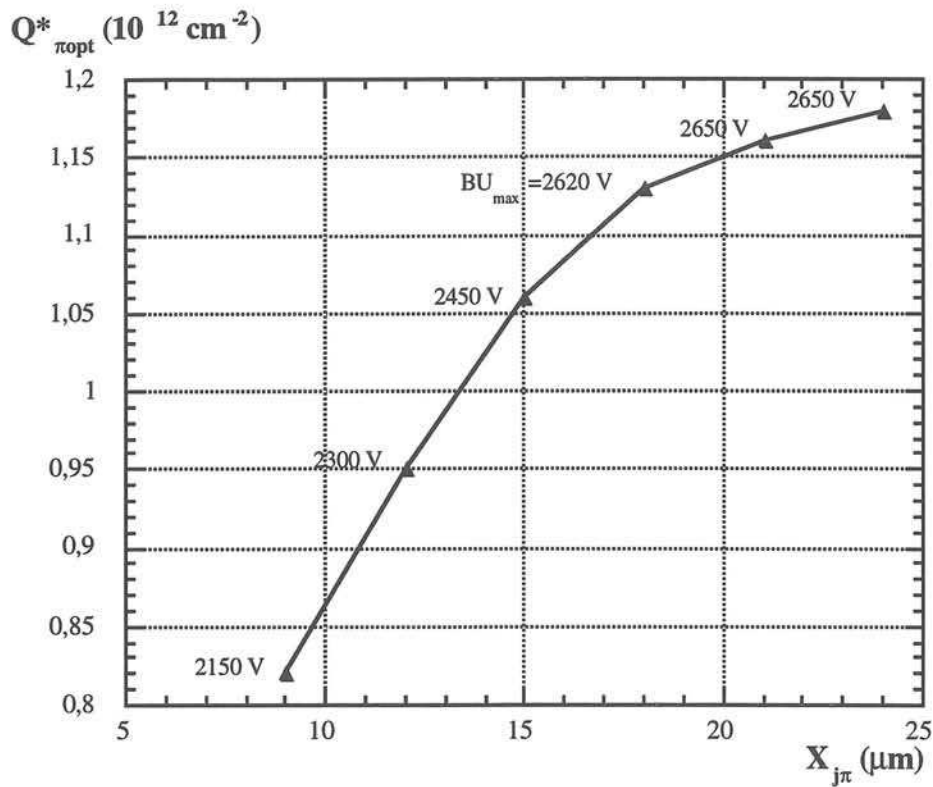


Figure 2.6: Dose optimale de bore actif dans la poche en fonction de sa profondeur $x_{j\pi}$ pour le substrat $100 \Omega.cm$, type N (simulation).

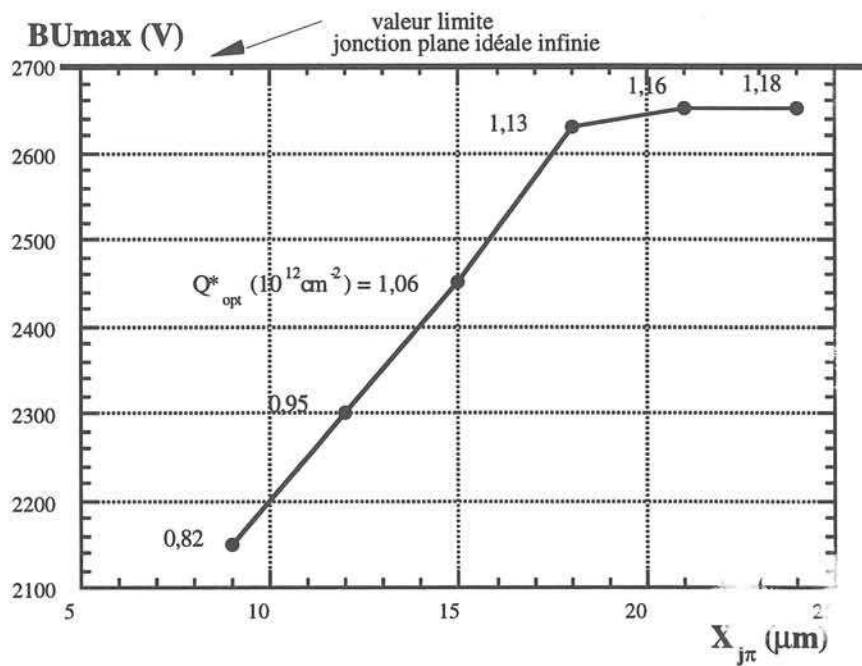


Figure 2.7: Tenue en tension maximale en fonction de la profondeur de poche $x_{j\pi}$ pour le substrat $100 \Omega.cm$, type N (simulation).

En plus, on voit que le fonctionnement de la périphérie semble avoir un comportement différent suivant que la dose active de la poche π se situe en dessus ou en dessous de $Q^*_{\pi opt}$.

Pour $Q^*_{\pi} \leq Q^*_{\pi opt}$:

La sensibilité de la tenue en tension vis à vis de Q^*_{π} est la plus faible ($1000 \text{ V}/10^{12} \text{ cm}^{-2}$) dans cette partie du graphique. Tant que $Q^*_{\pi} < Q^*_{\pi opt}$ la localisation du point de claquage se situe dans la zone d'intersection P^+/π ($\Delta P^+ \pi \# 50 \mu\text{m}$).

Quand $Q^*_{\pi} = Q^*_{\pi opt}$ alors $BU = BU_{max}$ et le point de claquage optimal se trouvera à $Y_M \# r_{P^+}$ (figure 2.2)

Pour $Q^*_{\pi} \geq Q^*_{\pi opt}$:

La sensibilité de la tenue en tension vis à vis de Q^*_{π} est beaucoup plus grande que précédemment (4000 V à $8000 \text{ V}/10^{12} \text{ cm}^{-2}$). Sur un plan technologique cette forte sensibilité présente un inconvénient majeur car elle impose de connaître, avec une grande précision, le rendement en bore actif de l'opération de diffusion.

En ce qui concerne la localisation du point de claquage (figure 2.8), nous avons constaté que l'augmentation de la dose active de la poche π a pour effet de déplacer le point de claquage vers l'extérieur du motif, dans la zone d'interface π/v à $Y_M \# r_{P^+} + L_{\pi}$.

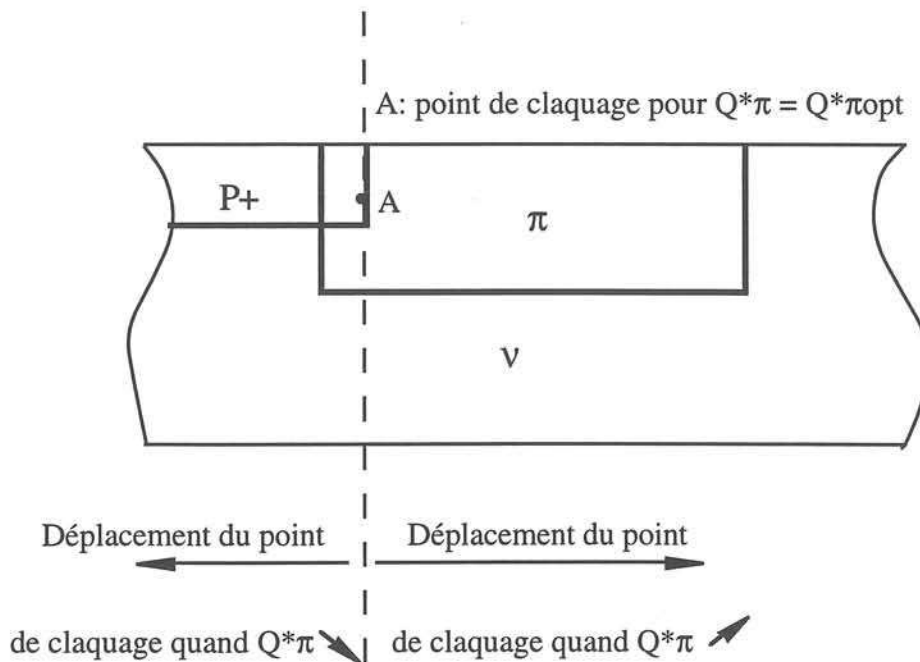


Figure 2.8 : Représentation qualitative du déplacement latéral du point de claquage en fonction de Q^*_{π}

II.2.3 Détermination de la profondeur et de la dose active de la poche optimale

Pour déterminer la profondeur et la dose active de la poche optimale du substrat silicium déjà sélectionné ($100 \Omega \cdot \text{cm}$ type N) on utilise les courbes des figures 2.6 et 2.7, devenus après alignement (figure 2.9). En choisissant par exemple un calibre de tension de 2500 V; on trouve:

$$Q^*_{\pi \text{opt}} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ et } x_{j\pi} = 16 \mu\text{m}.$$

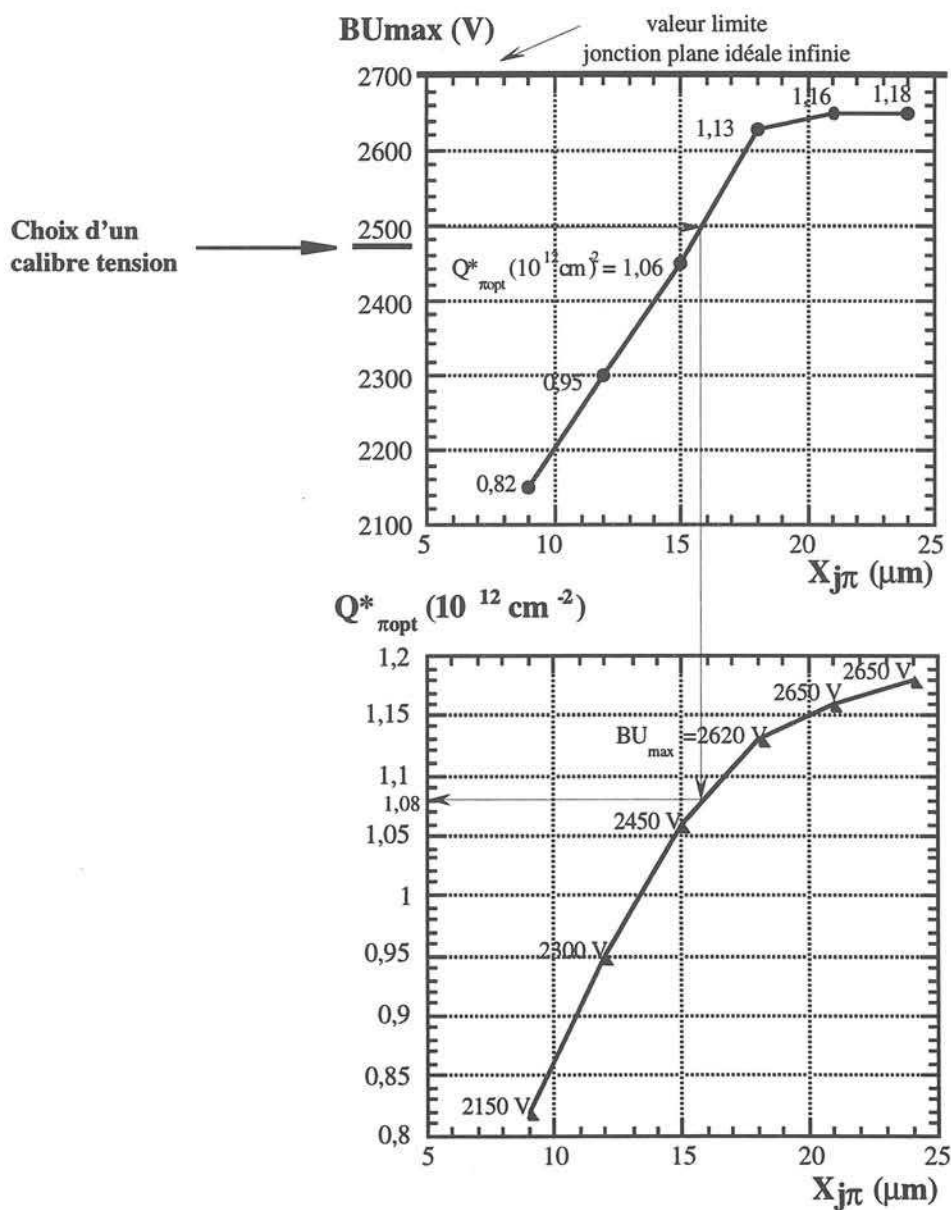


Figure 2.9 : Relation BU_{max} (V), $Q^*_{\pi \text{opt}}$, $x_{j\pi}$ pour un substrat $100 \Omega \cdot \text{cm}$ type N (simulation)

La méthodologie ainsi élaborée permet de réaliser une périphérie en poche cohérente vis-à-vis du substrat et du coût technologique que l'on acceptera de payer. En effet, dans le cas général, on ne peut pas se permettre une zone v de tenue en tension nominale très supérieure à l'utilisation (performance oblige). Faire tendre la tenue en tension périphérique du volume est un idéal, certes, mais onéreux si l'on songe aux $x_{j\pi}$ importants, gourmands en heures de diffusion; d'où la nécessité d'une optimisation. De toutes façon, ici, pour notre substrat $100 \Omega.cm$ type N avec $x_{jp} = 5 \mu m$ il ne peut évidemment être question de dépasser en simulation (ou autrement!) les 2700 V évoqués au paragraphe II.1.

Comme nous venons de l'établir, la dose active de la poche π est la grandeur prépondérante. En conception, la grandeur contrôlée pendant la phase d'implantation est la dose implantée dans la poche. Le rendement de l'implantation (η), défini comme le rapport entre ces deux doses, dépend de nombreux paramètres technologiques des phases d'implantation et de diffusion de la poche. Sans entrer dans une énumération longue et fastidieuse, mentionnons tout de même, comme grandeurs influentes, l'énergie et la dose d'implantation, ainsi que la température et le temps de diffusion.

Il est par conséquent difficile de ne retenir que la détermination de la dose active de la poche pour élaborer une périphérie performante.

II.2.4 Distribution du champ électrique dans la périphérie monopoeche

En polarisation inverse, la distribution du champ électrique dans la périphérie est une fonction de la concentration de dopage et de la tension appliquée.

A titre d'exemple nous l'avons étudiée pour trois doses différentes (avec la même profondeur de poche) sous une tension inverse fixée. Ces trois configurations sont développées suivantes:

Si le dopage est faible (cas $Q^*_{\pi} < Q^*_{\pi opt}$), une forte concentration des équipotentiellles se produit au niveau de la zone d'interface P^+/π (figure 2.10). Ce phénomène, qui apparait même pour des tensions inverses peu élevées, a pour effet de développer un champ électrique maximum autour de la jonction principale dans la zone d'interface P^+/π . Par la suite nous représentons cette zone par le point commun C sur la courbe (a) de la figure 2.13.

Au contraire si le dopage est trop important (cas $Q^*_{\pi} > Q^*_{\pi opt}$), la forte concentration des équipotentiellles se produit au niveau de la zone d'interface π/v (figure 2.11).

Dans ce cas le champ électrique maximum se situe à l'extérieur autour de cette interface au point appelé E sur la courbe (c) de la figure 2.13.

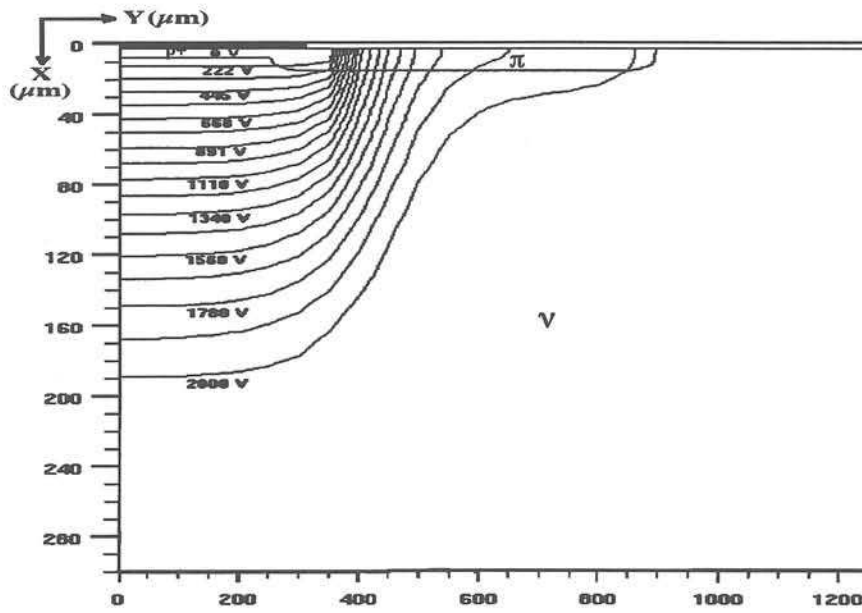


Figure 2.10 : Répartition des équipotentiellles dans une structure monopoeche moins dopée ($x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*\pi = 0,34 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) du substrat $100 \Omega.\text{cm}$, type N. Tension fictive inverse appliquée égale 2000 V (simulation).

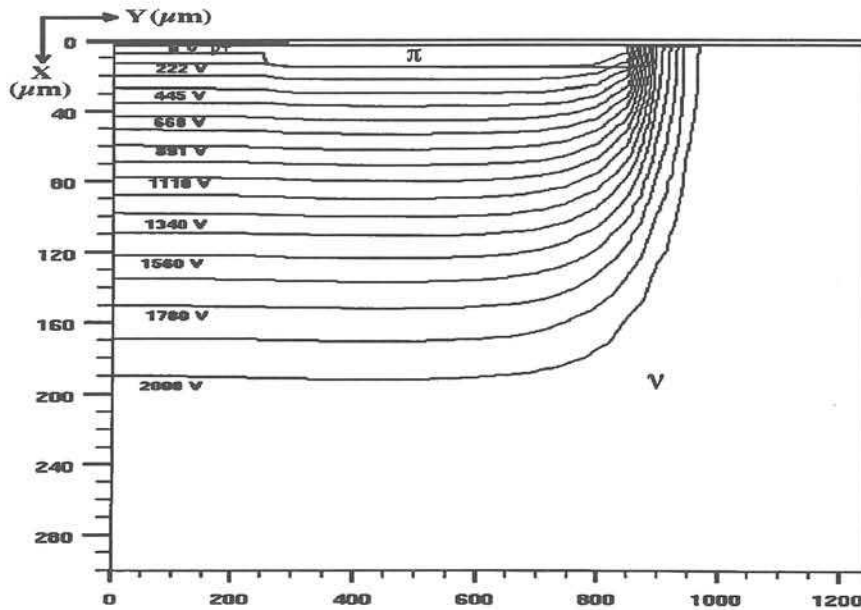


Figure 2.11 : Répartition des équipotentiellles dans une structure monopoeche trop dopée ($x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*\pi = 1,78 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) du substrat $100 \Omega.\text{cm}$, type N. Tension fictive inverse appliquée égale 2000 V (simulation).

Pour le cas optimal $Q^*\pi = Q^*_{\pi\text{opt}}$ (figure 2.12) les équipotentiellles sont réparties régulièrement dans la poche donc le champ électrique est distribué presque uniformément dans toute la poche π comme le montre la courbe (b) de la figure 2.13.

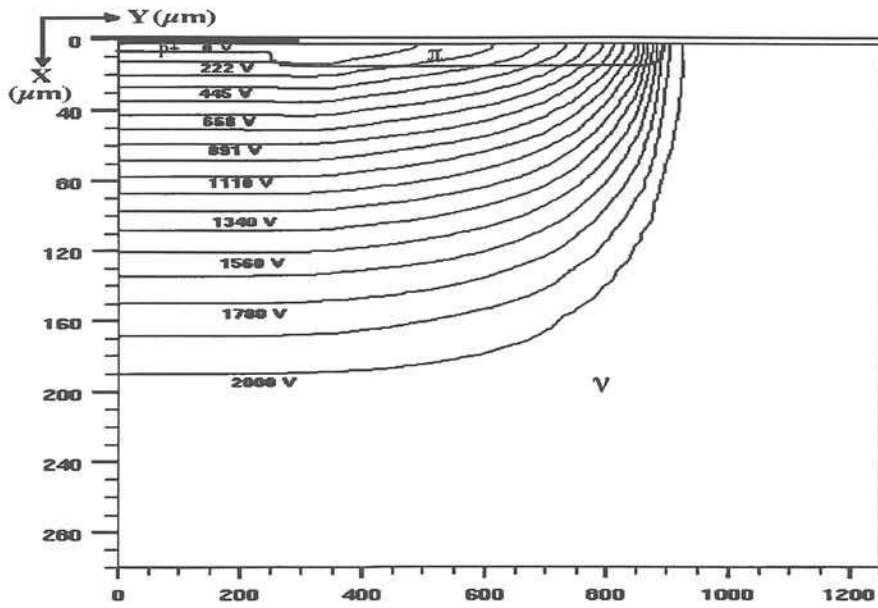


Figure 2.12 : Répartition des équipotentiels dans une structure monopoeche optimale ($x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*\pi = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) du substrat $100 \Omega.\text{cm}$, type N. Tension fictive inverse appliquée égale 2000 V (simulation).

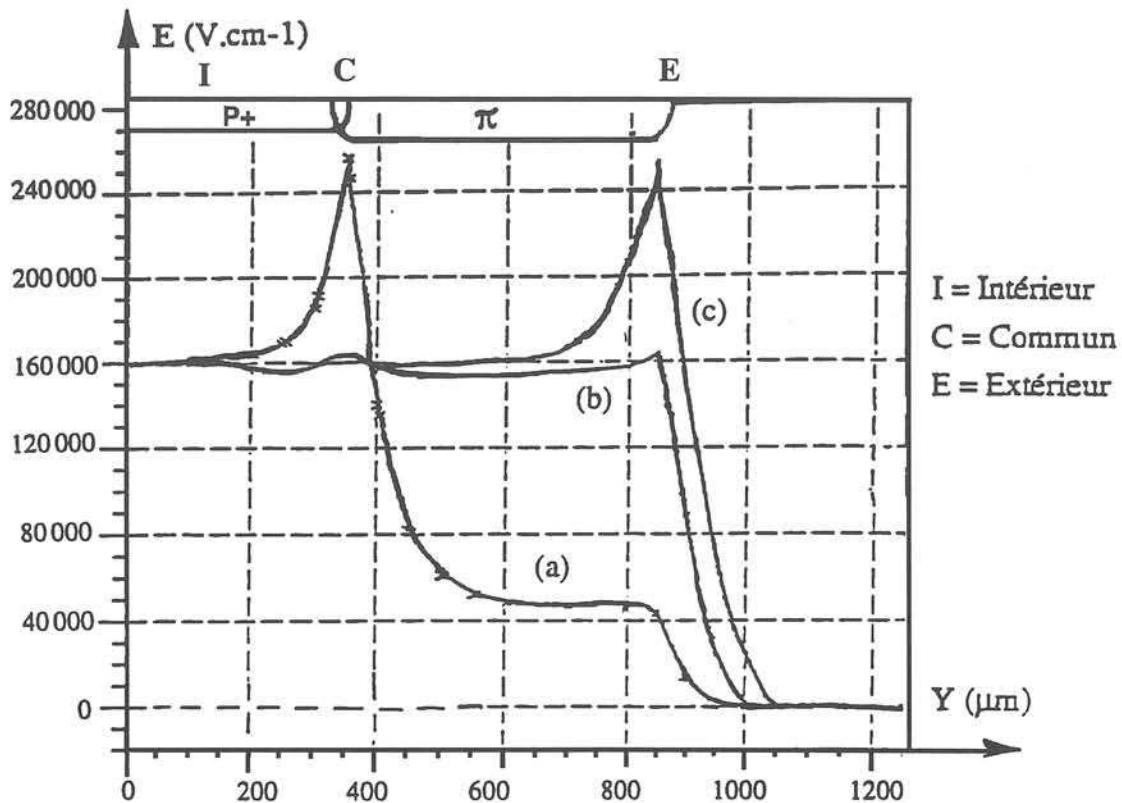


Figure 2.13 : Distribution du champ en périphérie. Tension fictive inverse appliquée égale 2000 V pour 3 cas de dose avec $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$ et substrat $100 \Omega.\text{cm}$ type N.

Courbe (a): $Q^*\pi = 0,34 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} < Q^*\pi_{\text{opt}}$. Courbe (b): $Q^*\pi = Q^*\pi_{\text{opt}} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
 Courbe (c): $Q^*\pi = 1,78 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} > Q^*\pi_{\text{opt}}$ (simulation)

Suite au comportement précédent, nous avons étudié les tendances de variation du champ électrique dans les trois zones particulières représentées par trois points, à savoir: zone extérieure (**point E**), zone d'interface P^+/π (**point C**), zone intérieure sous P^+ (**point I**) en fonction de la tension inverse appliquée pour trois doses différentes (à même profondeur de poche).

Selon la dose de la poche π les trois points hauts du champ électrique peuvent changer de position relative.

Pour $Q^*\pi < Q^*\pi_{opt}$ (figure 2.14)

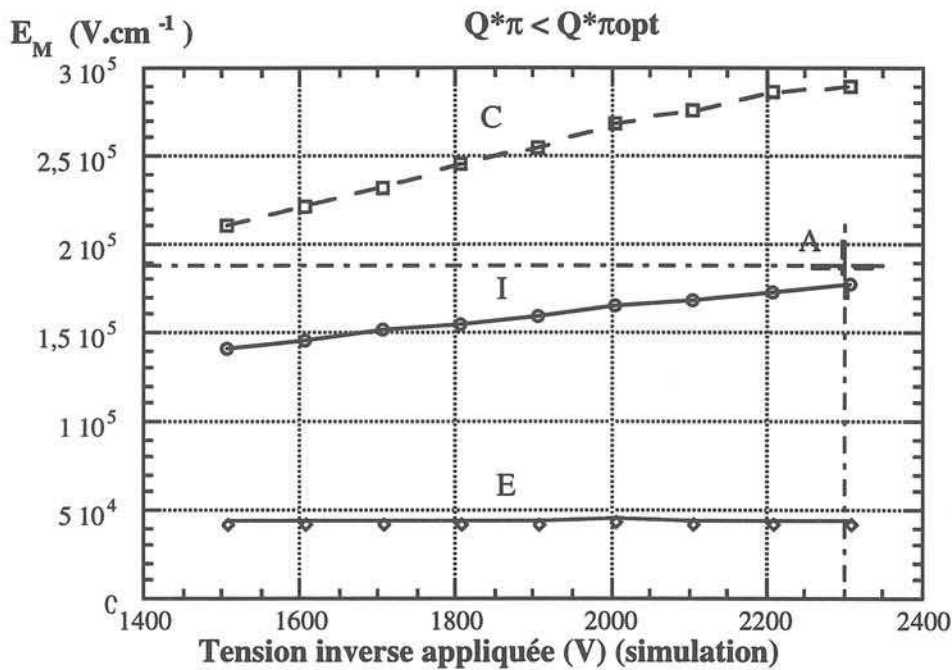


Figure 2.14 : Répartition du champ maximum en fonction de la tension appliquée pour le substrat $100 \Omega.cm$ type N, $x_{j\pi} = 12 \mu m$ avec $Q^*\pi = 0,34 \cdot 10^{12} cm^{-2} < Q^*\pi_{opt}$ (simulation).

Point A : Tension inverse appliquée = $B_{Umax} = 2300 V$ pour $x_{j\pi} = 12 \mu m$ $Q^*\pi = Q^*\pi_{opt} = 0,95 \cdot 10^{12} cm^{-2}$; $E_M = 1,9 \cdot 10^5 V.cm^{-1}$.

La partie externe, y compris le point E, est indépendante de la tension appliquée ; la valeur du champ est inférieure à celle des points C et I. Le champ du point C est le plus grand, quelle que soit la tension inverse appliquée. Le champ du point I varie entre les deux. Dans ce cas, le point de claquage se situe toujours à la zone d'interface P^+/π .

Pour $Q^*\pi > Q^*\pi_{opt}$ (figure 2.15): si l'on augmente la valeur de tension inverse appliquée les champs électriques aux points (I) et (C) varient légèrement. Celui au point (E) varie plus et il reste tout le temps supérieur aux deux autres. Dans ce cas le point de claquage se situe à l'extérieur.

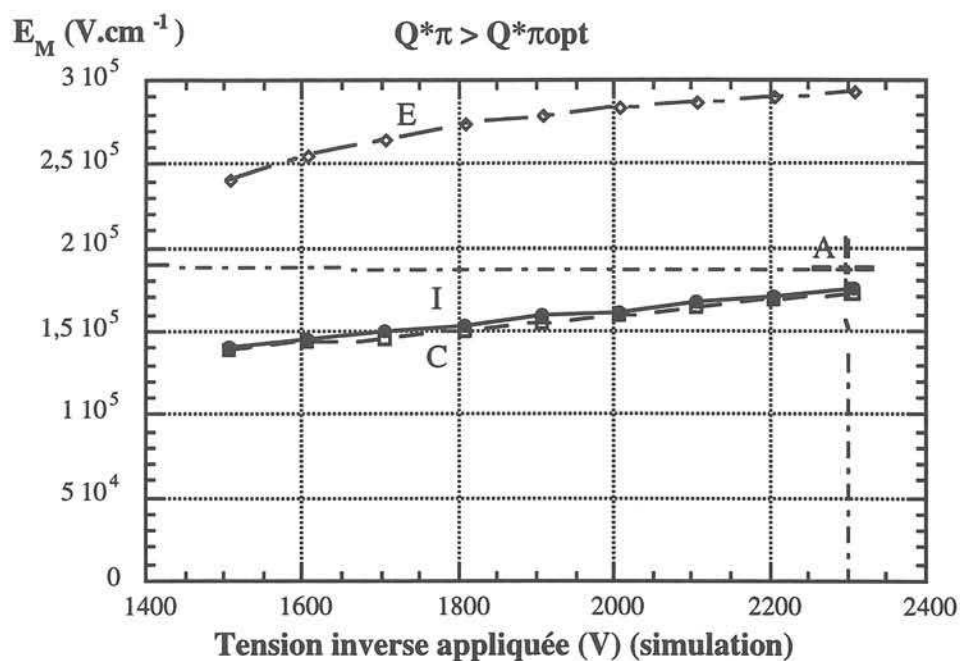


Figure 2.15 : Répartition du champ maximum en fonction de la tension appliquée pour le substrat $100 \Omega.cm$ type N, $x_j\pi = 12 \mu m$ avec $Q^*\pi = 1,78 \cdot 10^{12} cm^{-2} > Q^*\pi_{opt}$ (simulation). Point A : voir légende figure 2.14

Pour $Q^*\pi = Q^*\pi_{opt} = 0,95 \cdot 10^{12} cm^{-2}$ (figure 2.16)

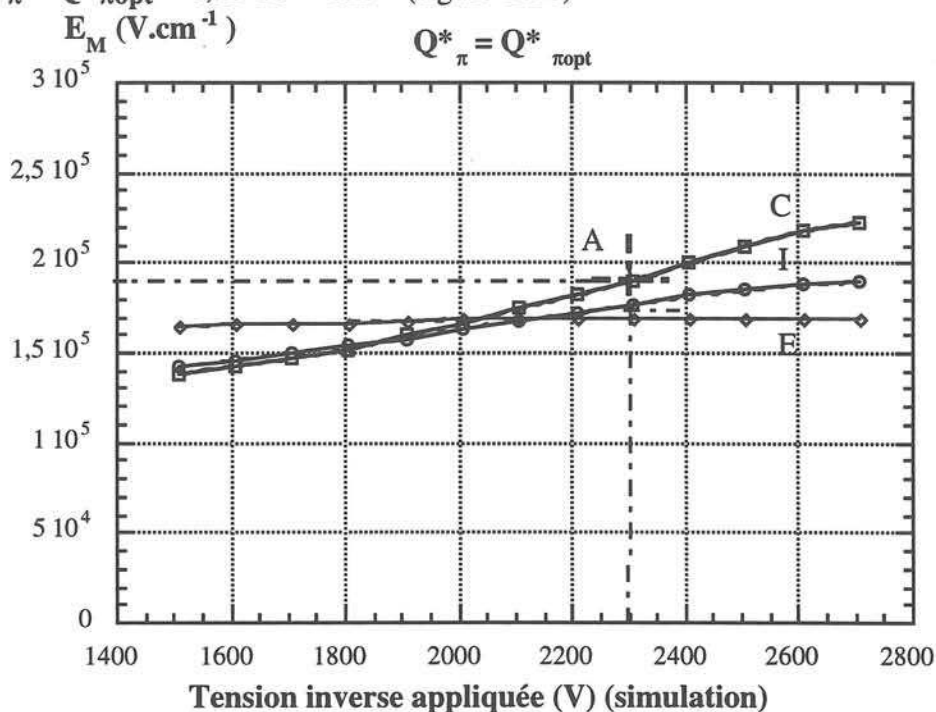


Figure 2.16 : Répartition du champ maximum en fonction de la tension appliquée pour le substrat N $100 \Omega.cm$, $x_j\pi = 12 \mu m$ avec $Q^*\pi = Q^*\pi_{opt} = 0,95 \cdot 10^{12} cm^{-2}$ (simulation). Point A : voir légende figure 2.14.

Les valeurs du champ électrique maximum aux trois points ont changé de positions relatives, le champ au point (E) est supérieur au début de la montée en tension, et contrairement le champ au point (C) l'est, vers la fin pour les plus fortes tensions. Celui au point (I) reste toujours entre les deux. Le champ électrique à l'extérieur reste constant lors de l'augmentation de la tension appliquée.

L'étude par simulation de la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active de poche π a été effectuée en supposant des profondeurs de jonction de poche constantes.

En pratique pour d'évidentes raisons de simplification, comme l'on conserve les autres étapes technologiques (le temps et la température de la diffusion, l'énergie de l'implantation), la dose implantée de poche influence directement la profondeur de jonction obtenue. Ainsi comme il est prévisible, la gamme d'implantation choisie pour le lot des tranches DPHT C2 (diodes à poche haute tension) variant de $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ à $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ on obtient aussi une variation de $x_{j\pi}$, la profondeur de poche π .

II.2.5 Tenue en tension en fonction de la résistivité du substrat

Dans cette étude on utilise la même structure monopoché avec la géométrie donnée dans le paragraphe II.2.1 mais avec 4 substrats silicium de type N, de résistivités différentes égales à 70, 100, 120 et 140 $\Omega \cdot \text{cm}$. Les profondeurs de la couche P^+ et de la poche π sont constantes et égales à 4,5 μm et 12 μm , respectivement. Les résultats de simulations sont présentés dans la figure 2.17

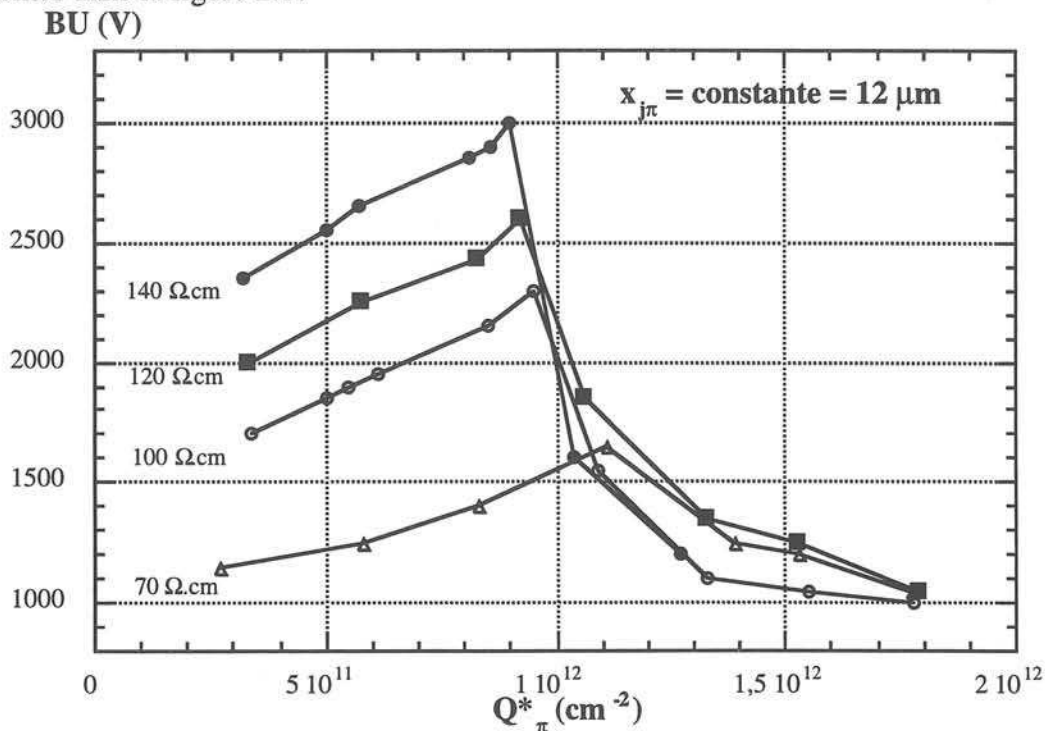


Figure 2.17 : Tenue en tension en fonction de la dose active Q^*_{π} de poche pour les différentes substrats avec une profondeur de poche de 12 μm (simulation).

Nous recherchons la dose active optimale pour chaque substrat pour la profondeur de la poche de 12 μm afin d'obtenir la meilleure tenue en tension de chaque substrat. Les résultats de simulation sont résumés dans le tableau de la figure 2.18

ρ ($\Omega.\text{cm}$)	$Q^*\pi_{\text{opt}}$ (10^{12} cm^{-2})	BU_{max} (V)
70	1,1	1800
100	0,95	2300
120	0,92	2550
140	0,9	3000

Figure 2.18 : Dose optimale de bore active dans la poche et tenue en tension maximale pour les différents substrats (voir figure 2.17) avec une profondeur de poche de 12 μm (simulation).

Il est clair qu'avec $x_j\pi = 12 \mu\text{m}$ on n'obtient pas la valeur maximale possible de claquage de chaque substrat. Ceci est visible pour ρ de 100 $\Omega.\text{cm}$ traité auparavant (cf.figure 2.9). On retrouve bien 2300 V pour 12 μm ainsi que $Q^*\pi_{\text{opt}} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ alors qu'avec $x_j\pi$ égale à 20 - 25 μm on obtient 2650 V - $1,2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ à l'optimum. Donc, attention à une interprétation trop rapide. Ici il s'agit, par choix délibéré, de $x_j\pi$ égale à 12 μm pour tous les cas. A partir de cela on cherche à en tirer le meilleur parti. Ceci dit, d'après les résultats des simulations pour les quatre substrats, nous voyons que, lorsque la résistivité du substrat augmente, la dose active optimale $Q^*\pi_{\text{opt}}$ diminue légèrement et la tension de claquage maximale s'accroît.

II.2.6 Tenue en tension en fonction de la longueur L_π de la poche

Différentes études [36, 38] montrent l'importance de la longueur de poche sur la tenue en tension. Pour un substrat de résistivité donnée, la tenue en tension est meilleure avec de plus grandes longueurs de poche. La structure étudiée dans le paragraphe II.2.2 avait une longueur de poche de 500 μm , mais cette longueur est-elle optimale?. Les résultats seraient-ils améliorés si l'on considérait une poche supérieure voire "infinie"? Ce paragraphe répond à ces questions.

Pour cela, le substrat choisi est toujours de type N 100 $\Omega.\text{cm}$. La couche P^+ a un rayon horizontal égal à 350 μm pour une profondeur de 4,5 μm . La concentration en surface est

de $8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. La longueur L_V est fixée à $400 \mu\text{m}$. La longueur de poche varie entre $100 \mu\text{m}$ et 14 mm tandis que sa profondeur reste égale à $12 \mu\text{m}$ et sa dose égale à $0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (à partir de la valeur optimale dans le réseau de la figure 2.5). Les résultats de simulation de la tenue en tension en fonction de la longueur L_π sont résumés dans la figure 2.19.

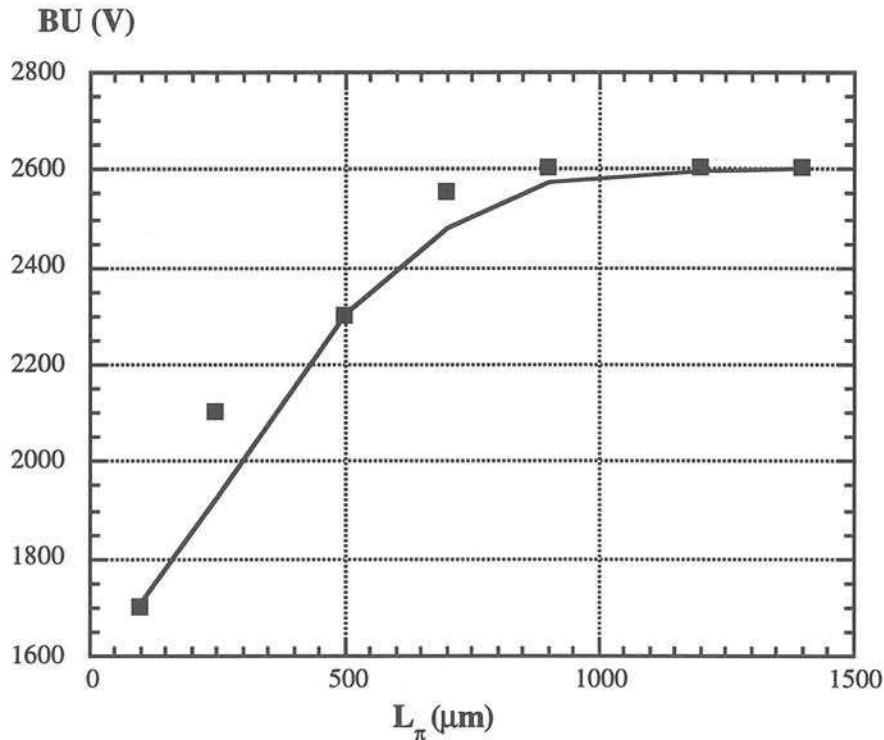


Figure 2.19 : Tenue en tension en fonction de la longueur L_π de poche pour le substrat $100 \Omega.\text{cm}$ type N, $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$ et $Q^*_{\pi} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (simulation).

Comme la profondeur de jonction, la longueur de la poche π est un facteur déterminant pour l'optimisation de la périphérie de poche.

Pour le substrat $100 \Omega.\text{cm}$ type N, une longueur de $250 \mu\text{m}$ de poche (tenue 2100 V) permet une augmentation de la tension de claquage de 400 V par rapport à une poche de $100 \mu\text{m}$ (tenue 1700 V). Pour une longueur de $700 \mu\text{m}$ (tenue 2450 V) la tension de claquage augmente de 150 V par rapport au résultat avec la longueur de $500 \mu\text{m}$ (tenue 2300 V). Au delà de $700 \mu\text{m}$ il semble que la tenue en tension reste constante.

Il existe donc une valeur maximale de la longueur de la poche π qu'il est inutile de dépasser.

CONCLUSION DU CHAPITRE II

Nous avons présenté dans ce chapitre l'optimisation d'une périphérie planar monopoeche. Le paramètre fondamental est la dose active implantée dans la poche. Les résultats de simulation montrent bien que cette dose est la première variable en importance à contrôler la tenue en tension de la périphérie car une valeur non adaptée conduit à un claquage précoce.

A partir de deux courbes simulées du couple des valeurs de la dose active optimale et de la tenue en tension maximale en fonction de la profondeur de poche π , nous avons établi une méthodologie de conception permettant de définir une périphérie en poche optimale pour une valeur de tension désirée.

Suite à la localisation du point de claquage selon la valeur de la dose active de poche nous avons obtenu la tendance de la variation du champ électrique en périphérie en fonction de la tension inverse appliquée pour trois doses implantées différentes.

Nous avons ensuite analysé les influences sur la tenue en tension des différents paramètres comme le dopage du substrat et la longueur de la poche. Tous ces paramètres jouent sur la tenue en tension. Celle - ci croît avec la longueur de la poche mais sa variation sature au delà d'une certaine valeur. Il est clair que pour des substrats moins dopés on peut viser des tensions de claquage supérieures.

En bref, cette protection permet d'obtenir des tensions de claquage proches de la valeur idéale de la tension de claquage de la jonction plane. Cependant elle est sensible à la dose implantée dans la poche. Cette dernière doit être choisie afin d'obtenir en fin de processus technologique la dose correspondant à la tension de claquage maximale.

Mais, nous avons vu que plusieurs éléments jouaient sur la tenue en tension. C'est, entre autres, le cas de la profondeur de jonction et de la longueur de la poche. Pour le premier paramètre, les limites technologiques de diffusion de dopant (bore) empêchent d'augmenter notablement ce paramètre. Au vu des installations disponibles et de leurs fonctionnement nous avons retenu une valeur compatible avec nos infrastructures ($x_j\pi = 12 \mu\text{m}$). Dans ces conditions, l'optimisation du second paramètre, longueur de la poche, s'est faite avec cette valeur constante de $x_j\pi$.

Les résultats obtenus sont utilisés comme valeurs initiales dans les simulations pour déterminer les étapes technologiques de réalisation de la périphérie en poche.

CHAPITRE III

Chapitre III

REALISATION DE DIODE A POCHE HAUTE TENSION (DPHT)

INTRODUCTION

Nous nous proposons de réaliser la périphérie planar monopoeche optimisée au chapitre précédent. Dans la première partie nous nous focaliserons sur les étapes technologiques les plus critiques. Pour cela il est fait appel aux logiciels SUPREM3 (unidimensionnel) et ATHENA/SUPREM (bidimensionnel) pour simuler les différents procédés technologiques. Nous allons étudier les influences des différents paramètres technologiques comme : énergie d'implantation, dose implantée, temps de diffusion, ambiance de diffusion sur le rendement du procédé d'implantation de poche et nous comparerons les résultats avec l'expérience afin de modifier, si nécessaire, les coefficients fixés par défaut par le logiciel.

En effet, la simulation de procédé nous permet de déterminer la profondeur de jonction de la couche, la concentration en surface et l'amplitude maximale et la position du pic de concentration. Ces renseignements permettent de définir un profil gaussien proche du profil réel. Il est également possible de déterminer la résistance carré "de la couche π ", paramètre physique mesurable directement pour contrôler.

Ensuite, nous décrirons la succession des étapes technologiques et nous présenterons les différents niveaux de masques correspondants.

La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée aux analyses des résultats expérimentaux en réalisant deux lots de DPHT C1 et DPHT C2 pour valider l'étude de l'influence des paramètres comme la dose implantée, la longueur de la poche, le dopage du substrat sur la sensibilité de la tenue en tension de périphérie planar monopoeche.

III.1 OPTIMISATION DES PROCEDES TECHNOLOGIQUES

III.1.1 Présentation du logiciel ATHENA / SUPREM

Le logiciel ATHENA [61] est l'environnement dédié à la simulation des procédés technologiques en deux dimensions, distribué par la société SILVACO. Il permet de simuler les étapes effectuées lors de la réalisation de circuits intégrés. ATHENA est basé d'une part, sur les modèles physiques décrivant l'évolution de ces processus, d'autre part il laisse la possibilité à l'utilisateur de pouvoir l'adapter aux processus déjà obtenus expérimentalement en ajustant certains des coefficients ou paramètres des modèles.

ATHENA est constituée d'une partie commune pour la simulation initiale du processus (maillage, type de substrat,...) et d'une série d'outils d'application spécifiques groupés par modules. Les principaux modules sont : SUPREM, ELITE, Optolith, et Flash.

Nous utilisons seulement le module SUPREM, lequel est employé pour l'analyse et l'optimisation des structures semiconductrices en silicium. Il permet de modéliser diverses étapes technologiques tel que l'implantation ionique, la diffusion, l'oxydation, l'épitaxie, le dépôt, la lithographie, etc...

SUPREM contient des techniques de discrétisation et des algorithmes très avancés pour le traitement numérique du maillage qui vont permettre de réduire de façon significative le temps de la simulation.

Il est également possible de définir des niveaux de masquage afin de convertir le réticule d'un masque en une structure dans un semiconducteur. Pour cela, les étapes technologiques sont identiques aux procédés expérimentaux : elles comprennent la phase de déposition, d'insolation, de développement et de gravure de la résine (positive ou négative). Une telle définition permet la réalisation quasi automatique du maillage, le simulateur définissant lui-même les régions "critiques" à partir des différents masques.

La spécification du problème est définie par les :

- dimensions de la structure.
- processus physiques (implantation, diffusion, gravure ...).
- modèles physiques.

III.1.1.1 Structure et maillage initial

L'obtention d'un maillage optimal pour la structure initiale représente ici une étape fondamentale pour le bon déroulement des calculs. Leurs temps et précision sont directement influencés par le nombre de nœuds que constitue le maillage. Un maillage fin doit exister dans les régions de la structure où se produiront des mécanismes de croissance, d'implantation ou de diffusion.

Le maillage rectangulaire initial doit représenter au mieux la structure. Cela peut se faire de la même manière que nous l'avons fait pour les structures définies dans la programmation par logiciel PISCES / ATLAS.

III.1.1.2. Modèles physiques SUPREM

Il est nécessaire de spécifier tous les paramètres et les coefficients correspondant à chaque matériel et à chaque type d'impureté. Par exemple, pour le silicium on peut indiquer l'orientation (100 par défaut) et le type de dopant. Pour l'impureté du substrat on peut indiquer sa concentration ou sa résistivité.

Les coefficients d'oxydation, de diffusion et de ségrégation des impuretés peuvent être aussi modifiés en fonction des résultats expérimentaux. SUPREM dispose de modèles physiques spécifiques pour chaque étape.

a. Implantation ionique:

Une simulation adéquate du processus d'implantation ionique est très importante à cause des technologies qui deviennent de plus en plus critiques. Le logiciel utilise par défaut la distribution Pearson IV et la technique statistique basée sur la méthode de Monte Carlo.

Pour chaque implantation il convient de préciser le type d'impureté (Bore, Arsenic, Phosphore, ...), la dose à implanter (cm^{-2}) et l'énergie d'implantation (keV).

b. Diffusion et Oxydation:

SUPREM contient 5 modèles d'oxydation. Ils sont tous basés sur le modèle linéaire-parabolique de Deal and Grove.

Pour chaque étape thermique on doit indiquer le temps du processus (minutes), la température ($^{\circ}\text{C}$), et la pression du gaz (atmosphères). Il est également possible de préciser la concentration des impuretés (cm^{-3}), le type d'ambiance gazeuse (humide, sec, azote,...), le débit du gaz.

En général, le coefficient de diffusion des impuretés dans le silicium dépend de la concentration. Cette dépendance varie avec le type d'impureté. SUPREM dispose d'un modèle avec des coefficients adaptés pour chaque impureté. Le coefficient de diffusion donné par défaut dépend uniquement du niveau de Fermi.

Lors de notre étude, nous avons conservé les valeurs par défaut des coefficients de diffusion fixés par le logiciel.

Le coefficient de ségrégation de l'impureté à l'interface SiO_2/Si est un paramètre très important, régissant la diffusion des espèces dopantes. Il est le rapport entre la concentration de l'impureté à l'équilibre dans le silicium et celle dans la silice à l'interface SiO_2/Si . Il est défini par la relation:

$$m = \text{SEG}.0 \exp\left(-\frac{\text{SEG}.E}{kT}\right) \quad (3.1)$$

- SEG.0 : rapport de la concentration du bore (par exemple) dans silicium par rapport à celle dans l'oxyde.
- SEG.E : énergie d'activation.

Par défaut dans logiciel SUPREM: SEG.0 =1126 ; SEG.E = 0,91 eV. On a m = 1 à 1160°C .

Pour tenir compte du phénomène de l'exodiffusion pendant la phase de longue diffusion pour une jonction plus profonde et à partir des résultats expérimentaux, selon le travail [38] on choisit un couple de valeurs adapté aux diffusions profondes :

- $SEG.0 = 31,5$; $SEG.E = 0,527$ eV. Alors, m est modifié et égal à 0,44 à 1160° C.

Les fichiers de sortie de ATHENA/SUPREM contiennent toutes les informations relatives à la structure. Ils sont sous forme :

- de valeur comme l'épaisseur d'une couche, la profondeur de jonction, la dose totale dans les couches, la concentration en surface, la résistance carrée...
- de graphiques: en une dimension, on peut obtenir des profils d'implantation avant et après redistribution des impuretés dopantes.

En deux dimensions, on peut voir les frontières entre matériaux, le maillage, les courbes d'isoconcentration...

Ces fichiers de sortie de l'ATHENA présentent l'intérêt d'être compatibles avec les fichiers d'entrée du logiciel ATLAS/PISCES. Mais pour notre simulation nous n'avons pas réussi à utiliser cette possibilité : le nombre de nœuds est trop limité sur ce dernier.

III.1.2 Dose active en fonction des paramètres technologiques

La redistribution des espèces dopantes est une étape primordiale dans la réalisation des composants. Elle s'effectue par un recuit thermique en four à haute température pendant un temps donné.

Une diffusion sous azote (ou tout autre gaz inerte) présente l'avantage de ne pas consommer du silicium. Cependant, la surface du composant en contact direct avec le milieu ambiant facilite l'exodiffusion: les impuretés du diffusant sortent du solide où ils sont en forte concentration, pour se répandre dans le gaz où la concentration est toujours très faible. Il se produit donc, simultanément, une diffusion vers l'extérieur (d'où une perte de diffusant) et une diffusion vers l'intérieur du silicium.

Une diffusion avec oxydation sèche ou humide permet de limiter ce phénomène car la couche d'oxyde en formation emprisonne le dopant dans le silicium, mais partiellement car la silice accepte plus ou moins ces atomes. En contrepartie, cette oxydation consomme du silicium, limite l'épaisseur de la couche dopée et des impuretés se retrouvent dans la couche de SiO_2 . Alors, le rendement de l'implantation dépend de nombreux paramètres technologiques en phase d'implantation et de diffusion.

Pour créer une zone P^+ ou π , il est nécessaire d'implanter une impureté introduisant un niveau accepteur. Parmi les impuretés disponibles celles utilisées sont le bore, le gallium ou l'aluminium. Classiquement les filières les plus répandues pour les composants de

puissances utilisent le bore. En effet le gallium présente le désavantage de traverser l'oxyde de silicium, interdisant d'utiliser ce dernier comme masquage.

Quant à l'aluminium, bien que son coefficient de diffusion élevé le prédestine à la réalisation de jonction profonde, il présente le gros inconvénient de réduire les atomes d'oxygène piégés dans le silicium et par la même de provoquer des concentrations non homogène.

III.1.2.1 Energie d'implantation

Le but de ces simulations est d'étudier l'influence de l'énergie de l'implantation sur la profondeur de poche et de la dose de bore restante après redistribution.

L'implantation se fait sur un substrat type N de résistivité égale à $100 \Omega \cdot \text{cm}$, avec une dose de bore pour implanter dans la poche π autour de $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. L'énergie de l'implantation varie de 60 keV à 360 keV. L'étape de redistribution se déroule à une température de 1160°C pendant 100 h sous oxygène.

Pour chaque énergie, nous avons obtenu les valeurs de :

- $C_{s\pi}$: concentration de bore en surface de silicium
- $x_{j\pi}$: profondeur de la poche π
- R_{\square} : résistance carré de la couche
- Q^*_{π} : dose active de bore dans la poche
- η : pourcentage de bore actif après diffusion.

Les résultats des simulations sont donnés dans le tableau de la figure 3.1

Énergie (keV)	60	100	160	240	360
$x_{j\pi}$ (μm)	17,1	17,2	17,4	17,5	17,7
$C_{s\pi}$ (cm^{-3})	$7,5 \cdot 10^{14}$	$7,8 \cdot 10^{14}$	$8,1 \cdot 10^{14}$	$8,6 \cdot 10^{14}$	$9,5 \cdot 10^{14}$
R_{\square} (Ω)	8244	7916	7550	7069	6556
Q^*_{π} (cm^{-2})	$1,66 \cdot 10^2$	$1,7 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^2$	$1,9 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^{12}$
η %	41,5	43,25	45,3	48,5	52,5

Figure 3.1 : Dose active Q^*_{π} du bore dans la poche en fonction de l'énergie d'implantation (diffusion 100 h, 1160°C sous oxygène) pour le substrat $100 \Omega \cdot \text{cm}$ type N (simulation).

De l'analyse de ces résultats nous pouvons extraire trois remarques principales :

La première est qu'il ne semble pas y avoir de limite à l'énergie d'implantation. Plus l'énergie est élevée, plus la dose active augmente, en même temps que la profondeur de jonction.

Ensuite, l'augmentation de l'énergie d'implantation de 60 keV à 360 keV permet d'améliorer le rendement de diffusion de poche d'un facteur 1,3 ; le pourcentage de dopant actif passant

de 41,2 % à 52,5 %.

Quant à la profondeur de la poche, elle passe de 17,0 à 17,7 μm pour le substrat N 100 $\Omega\cdot\text{cm}$. Cependant, même avec une implantation à 360 keV, 47,5% du bore implanté a exodiffusé. Ceci constitue l'inconvénient de longues diffusions sous oxygène: la croissance de l'oxyde entraîne une consommation importante de silicium, donc de dopant.

III.1.2.2 Dose implantée

Le but de ces simulations avec le logiciel SUPREM3 est d'étudier l'influence de la dose de l'implantation sur la profondeur de poche et la dose de bore restant après redistribution.

Nous avons considéré un substrat type N de résistivité égale à 100 $\Omega\cdot\text{cm}$, avec une dose d'implantation de poche π variant de $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ à $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. L'énergie de l'implantation est fixée à 160 keV. L'étape de redistribution se déroule à une température de 1160°C pendant 100 h sous oxygène. Les résultats des simulations sont donnés dans le tableau de la figure 3.2

Dose d'impl. (10^{12} cm^{-2})	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$x_{j\pi}$ (μm)	15,8	16,3	16,7	17,1	17,4	17,6	17,8
$C_{s\pi}$ (cm^{-3})	$4,1 \cdot 10^{14}$	$5,1 \cdot 10^{14}$	$6,0 \cdot 10^{14}$	$7,1 \cdot 10^{14}$	$8,1 \cdot 10^{14}$	$9,1 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{15}$
R_{\square} (Ω)	15810	12410	10220	8684	7550	6680	5990
$Q^*\pi$ (cm^{-2})	$8,7 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$2,1 \cdot 10^{12}$	$2,3 \cdot 10^{12}$
η %	44	44	44	45	45	46	46

Figure 3.2: Dose active $Q^*\pi$ du bore dans la poche en fonction la dose implantée (énergie 160 keV, diffusion 100 h, 1160°C sous oxygène) pour le substrat 100 $\Omega\cdot\text{cm}$ type N (simulation).

Comme l'on maintient invariantes les autres étapes technologiques (temps, température de diffusion et énergie d'implantation), la dose implantée pour la poche influence simultanément la profondeur de la jonction de poche et sa dose active.

Ainsi il n'est pas évident d'optimiser à la fois la profondeur $x_{j\pi}$ et la dose active $Q^*\pi$ de la poche π pour obtenir la valeur maximale de la tension de claquage. Pour y arriver il faudrait par exemple, garder fixé l'énergie d'implantation, soit à peu près constant le rendement, et ensuite jouer simultanément sur la dose implantée et le temps de diffusion afin de contrôler les deux autres paramètres $x_{j\pi}$ et $Q^*\pi$.

III.1.2.3 Temps de diffusion

A titre d'exemple on fait l'implantation à 160 keV avec une dose de $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$; la diffusion est supposée avoir lieu à 1160°C (ou à 1130°C) sous oxygène avec un temps

variant de 80h à 200h. Les résultats des simulations sont donnés dans les tableaux des figures 3.3 et 3.4.

Temps (h)	80	100	120	160	200
$x_{j\pi}$ (μm)	15,8	17,4	18,7	21,2	24
$C_{S\pi}$ (cm^{-3})	$1,2 \cdot 10^{15}$	$8,1 \cdot 10^{14}$	$1,8 \cdot 10^{15}$	$1,2 \cdot 10^{15}$	$8,2 \cdot 10^{14}$
R_{\square} (Ω)	7270	7550	7745	8130	8421
$Q^*\pi$ (cm^{-2})	$1,88 \cdot 10^{12}$	$1,81 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{12}$
η %	47	45	44	42	39

Figure 3.3 : Dose active $Q^*\pi$ du bore dans la poche en fonction du temps de diffusion (dose implantée $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, énergie 160 keV, température 1160°C sous oxygène) pour le substrat $100 \Omega \cdot \text{cm}$ type N (simulation).

Temps (h)	80	100	120	160	200
$x_{j\pi}$ (μm)	12,1	13,2	14,2	16,1	17,6
$C_{S\pi}$ (cm^{-3})	$2,5 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,1 \cdot 10^{15}$	$9,3 \cdot 10^{14}$	$9,7 \cdot 10^{14}$
R_{\square} (Ω)	7850	8210	8520	9000	9410
$Q^*\pi$ (cm^{-2})	$1,8 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	$1,5 \cdot 10^{12}$
η %	44	42	41	38	37

Figure 3.4 : Dose active $Q^*\pi$ du bore dans la poche en fonction du temps de diffusion (dose implantée $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, énergie 160 keV, température 1130°C sous oxygène) pour le substrat $100 \Omega \cdot \text{cm}$ type N (simulation).

L'augmentation de 80h à 200h de diffusion permet de multiplier la profondeur de poche par 1,5 fois observant ainsi $\# (200 / 80)^{1/2}$. Cependant le rendement de la diffusion de poche est diminué de 47% à 39% (à 1160° C). Plus le temps de diffusion est long plus la croissance de l'oxyde se fait avec une certaine consommation de silicium contenant le bore. Afin d'éviter ce phénomène de l'exodiffusion, la diffusion de poche peut se faire dans la plus grande partie du temps sous ambiance d'azote avec l'avantage de ne pas consommer de silicium et donc, a priori, d'augmenter le rendement du procédé de diffusion. Par contre il y a risque d'augmenter le passage direct du bore du silicium dans N_2 , sans freinage. Ce phénomène n'est pas abordé dans le logiciel SUPREM donc limite la possibilité de bien simuler ce procédé.

III.1.2.4 Ambiance de diffusion

Pour cette étude, nous procédons de la même manière que lors de la simulation précédente.

Le substrat, la dose et l'énergie d'implantation sont identiques à celles de l'étude sur l'influence du temps de diffusion (fixé ici à 100 h au total). Seule, la proportion du temps sous l'oxygène et sous l'azote va être variable.

Les résultats des simulations pour les deux énergies de 160 keV et 360 keV sont résumés dans les tableaux des figures 3.5 et 3.6. La diffusion commence par O₂ (1) puis se termine sous N₂ (2).

(1) Temps (h) O ₂	100	50	10	1	0
(2) Temps (h) N ₂	0	50	90	90	100
$x_{j\pi}$ (μm)	17,4	17,6	18,03	18,57	18,8
$C_{s\pi}$ (cm ⁻³)	$8,13 \cdot 10^{14}$	$1,23 \cdot 10^{15}$	$1,28 \cdot 10^{15}$	$1,6 \cdot 10^{15}$	$1,55 \cdot 10^{15}$
R_{\square} (Ω)	7550	6789	5302	3905	3615
$Q^*\pi$ (cm ⁻²)	$1,81 \cdot 10^{12}$	$2,05 \cdot 10^{12}$	$2,58 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^{12}$	$3,8 \cdot 10^{12}$
η %	45,3	51,25	64,5	88	95

Figure 3.5 : Dose active $Q^*\pi$ du bore dans la poche en fonction de l'ambiance de diffusion (dose implantée $4 \cdot 10^{12}$ cm⁻², énergie 160 keV, diffusion 1160°C) pour le substrat 100 Ω.cm type N (simulation).

(1) Temps (h) O ₂	100	50	10	1	0
(2) Temps (h) N ₂	0	50	90	99	100
$x_{j\pi}$ (μm)	17,7	17,9	18,4	18,8	18,9
$C_{s\pi}$ (cm ⁻³)	$9,5 \cdot 10^{14}$	$1,42 \cdot 10^{15}$	$1,44 \cdot 10^{15}$	$1,58 \cdot 10^{15}$	$1,54 \cdot 10^{15}$
R_{\square} (Ω)	6556	5924	4672	3747	3608
$Q^*\pi$ (cm ⁻²)	$2,1 \cdot 10^{12}$	$2,31 \cdot 10^{12}$	$2,93 \cdot 10^{12}$	$3,66 \cdot 10^{12}$	$3,9 \cdot 10^{12}$
η %	53	57,8	73,3	91,5	97

Figure 3.6 : Dose active du bore dans la poche en fonction de l'ambiance de diffusion (dose implantée $4 \cdot 10^{12}$ cm⁻², énergie 360 keV, diffusion 1160°C) pour le substrat 100 Ω.cm type N (simulation).

L'oxyde sec (l'humide ferait de même) emprisonne le bore dans la phase initiale. Puis, la diffusion sous azote permet d'augmenter la profondeur de jonction sans consommer du silicium limitant donc la perte de dopant. Mais, en comparant avec les résultats expérimentaux de la société IBS (Gréasque) et du laboratoire DSO (St Jérôme Marseille) le

phénomène d'exodiffusion paraît mal simulé avec ce logiciel. En effet, les mesures sur des cas concrètement effectués montrent que la diffusion sous azote s'accompagne d'une perte importante de dopant par exodiffusion directe Si - ambiance. En outre il y a une diminution de la durée de vie des porteurs.

III.2 METHODES DE CARACTERISATION

III.2.1 Profils d'impuretés par SRP

La profondeur et la concentration en surface de la poche π et de la couche P^+ sont mesurées par Sondage Résistif Ponctuel (SRP). Cette résistance de constriction fournit une mesure très localisée de la résistance d'un matériau. Dans le cas d'un semiconducteur, nous pouvons en déduire la concentration, donc la profondeur de jonction et ainsi caractériser le profil du dopage (figure 3.7).

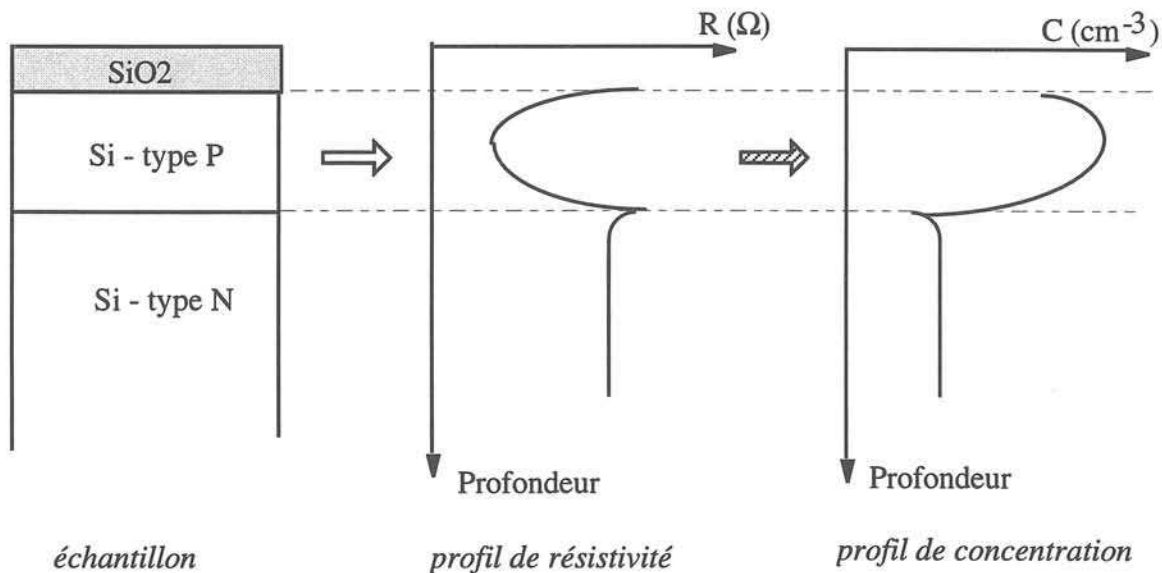


Figure 3.7 : Principaux résultats de la résistance ponctuelle (SRP)

III.2.1.1 Méthode SRP

Pour faire la mesure par Sondage Résistif Ponctuelle, on applique deux pointes métalliques très fines (quelques microns de diamètre) à la surface de l'échantillon biseauté suivant un angle α très faible (figure 3.8). On injecte un courant I très faible (de l'ordre de 0,5 mA à 1 mA) et mesure la chute de tension V entre ces deux pointes. On obtient alors une résistance brute de sondage R_s :

$$R_s = \frac{V}{I} \quad (3.2)$$

Les lignes de champ électrique, donc de courant, se concentrent au voisinage de chacun des contacts. Ainsi, la résistance au passage du courant (résistance de volume) est essentiellement due à la résistance du matériau au voisinage des pointes. Ceci est la

caractéristique principale de cette méthode, car elle permet de réaliser des mesures fines et localisées.

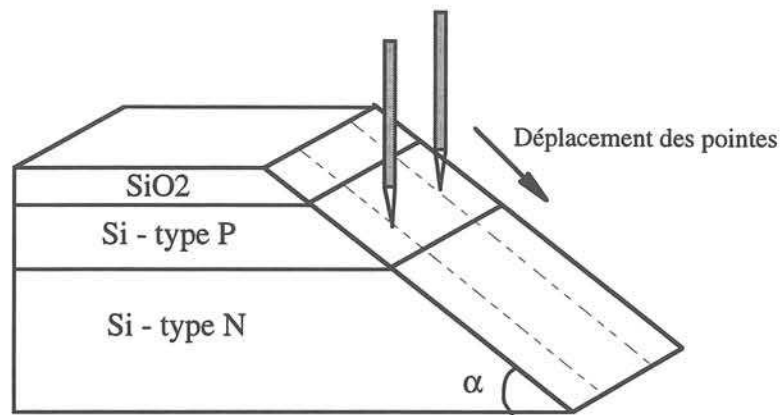


Figure 3.8 : Détermination de profils de porteurs par Sondage Résistif Ponctuel (SRP)

Si l'on suppose que le matériau a une résistivité ρ constante au voisinage des pointes, que chaque pointe a une rayon égal à a et pour le cas idéal, que les pointes ne pénètrent pas dans le matériau, on montre que :

$$R_s = \frac{\rho}{2a} \quad (3.3)$$

en négligeant la résistance de contact des pointes (figure 3.9)

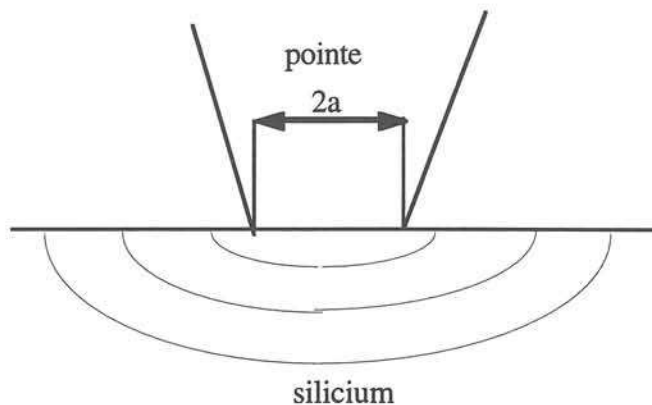


Figure 3.9 : Pointe idéal pour la mesure de R_s

Il faut noter que l'on n'est jamais dans le cas idéal : la pointe s'enfonce dans le semiconducteur en créant une dépression de faible profondeur et on ne peut négliger la résistance de contact. La résistance mesurée est en fait la somme de deux valeurs: la résistance du matériau (R_s) et la résistance de contact (R_c). Toute la difficulté de l'analyse est de conserver une résistance de contact aussi constante et reproductible que possible; en effet, celle-ci dépend de nombreux facteurs tels que l'état de surface du matériau,

l'orientation cristalline, les caractéristiques intrinsèques des pointes (écartement, vieillissement, ...), le dopage du silicium.

Dans le cas général, pour un matériau de dopage uniforme R_s peut être définie par (3.4)

$$R_s = R_c(\rho) + \frac{\rho}{2a} \quad (3.4)$$

où: • a correspond à un rayon effectif de pointes, qu'il est difficile d'obtenir de manière rigoureuse.

• $R_c(\rho)$ est la résistance de contact au point de mesure

Cette méthode exige donc un étalonnage $R_c(\rho)$ devant être régulièrement effectué grâce à un lot d'échantillons de résistivité constante connue.

III.2.1.2 Profils de porteurs

Pour obtenir la distribution des impuretés en profondeur, il suffira de déplacer les pointes pour mesurer la résistance $R_s(x_i)$, x_i étant la position des pointes sur le biseau de la figure 3.8. L'angle α est choisi en fonction de la profondeur de jonction. Pour une jonction relativement profonde comme dans notre cas, l'angle α choisi est de l'ordre de 2° .

Il faut ensuite déduire le profil de résistivité $\rho(x_i)$ des valeurs $R_s(x_i)$ relevées. Le problème n'est pas facile, en particulier parce que la forme des lignes de courant et des équipotentielles autour de la pointe dépend du profil de résistivité.

Parmi les logiciels résolvant cette déconvolution, le CIME utilise le logiciel IMECPROF de l'IMEC. Celui-ci suppose que la résistance mesurée en chaque point se met sous la forme (3.5):

$$R_s = R_c(\rho) + \frac{\rho}{2a} CF(\rho, a, S) \quad (3.5)$$

où: • $CF(\rho, a, S)$ est un facteur de correction dépendant de la résistivité (ρ), du rayon des pointes (a) et de la distance (S) entre les pointes.

Avec cette hypothèse, et disposant de courbe d'étalonnage, le logiciel déduit à partir de la mesure brute un profil de résistivité et ensuite un profil de dopage.

La gamme de dopage mesurée s'échelonne de 10^{11} à 10^{21} cm^{-3} . Cette méthode est destructive et nécessite une préparation très soignée du biseau.

III.2.2 Caractérisation électrique

III.2.2.1 Résistance carré par 4 pointes

Cette méthode non destructive [2], consiste à mesurer la tension U aux bornes de deux pointes "intérieures" lorsqu'un courant I , de valeur connue, est injecté par deux autres pointes "extérieures" alignées avec les deux premières, le tout avec 3 intervalles de séparation indentiques (figure 3.10)

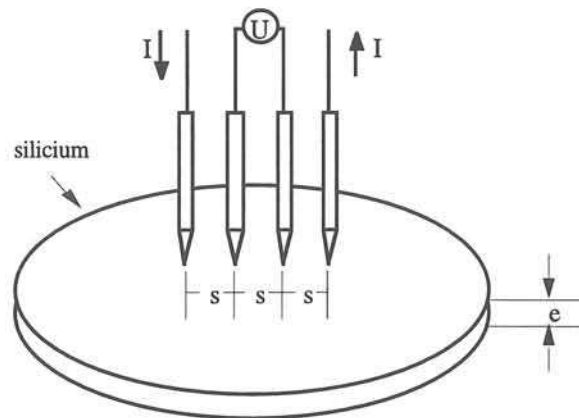


Figure 3.10 : Schéma de principe de la mesure de résistivité par la méthode des quatre pointes en ligne.

En supposant que l'échantillon est homogène, infini et que la distance entre deux contacts est très supérieure à l'épaisseur de la couche caractérisée, la résistance carré peut être définie par (3.6):

$$R_{\square} = 4,53 \ U/I \quad (3.6)$$

et la résistivité moyenne du matériau est telle que:

$$\rho = R_{\square} \times e \quad (3.7)$$

La mesure de résistance carré est très facile à mettre en oeuvre, elle donne la possibilité d'estimer rapidement la dose active résiduelle après la diffusion.

La dose active de la poche π est calculée à partir de la valeur de la résistance carré (R_{\square}) en supposant une mobilité de trous constante et égale à $\mu_p = 470 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$ par la formule:

$$Q^*_{\text{act}} (\text{cm}^{-2}) = 1,33 \cdot 10^{16} / R_{\square} (\Omega) \quad (3.8)$$

III.2.2.2 Caractérisation de tension de claquage

Les diodes ont été testées en tension de claquage sous pointes à l'aide d'une source de tension continue variable de 500V à 4000V conçue et réalisée au Laboratoire Electrotechnique de Grenoble (LEG).

Ce générateur haute tension fonctionne à partir d'un accumulateur 12V et permet deux types de caractérisation :

- la caractérisation statique en mode générateur de tension continue limité en courant de manière ajustable et de l'ordre du milliampère. Ce mode de fonctionnement permet de caractériser en inverse la jonction sans risque de détérioration.
- la caractérisation dynamique en mode pulsé à faible rapport cyclique avec des courants de plusieurs dizaines de miliampères. N'ayant besoin que de la caractérisation statique inverse de la jonction, nous avons utilisé la sortie en mode continu pour notre étude.

Le schéma simplifié du banc de test est montré sur la figure 3.11

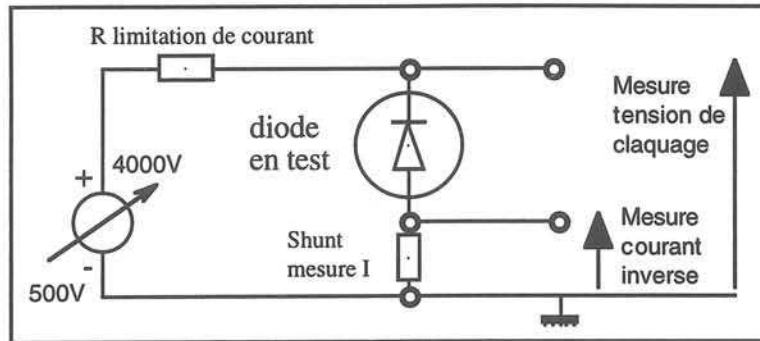


Figure 3.11: Schéma électrique simplifié du banc de caractérisation statique inverse

Les mesures sous pointes des différents motifs ont permis dans un premier temps de analyser l'influence des différents paramètres géométriques et technologiques sur la tenue en tension.

III.3 REALISATION DES DPHT MONOPOCHE

III.3.1 Masques et principales étapes technologiques pour des DPHT C1 et DPHT C2

Nous illustrerons le processus de fabrication des diodes à poche à haute tension (DPHT) en présentant pour chaque étape les dessins des différents niveaux de masques et les coupes du dispositif. Ces diodes ont une forme générale circulaire pour minimiser l'effet de jonction sphérique. Elles ont été réalisées sur des tranches de silicium de diamètre 100 mm ou 75 mm. Chaque diode se présente sous la forme d'un pavé de silicium ayant 3 mm de côté. Le jeu de masques se compose de 5 niveaux permettant de réaliser 100 diodes en même temps sur chaque tranche.

Afin de contrôler le déroulement du processus technologique, après chaque étape thermique des mesures d'épaisseur d'oxyde, de résistance carré et de SRP sont effectuées sur des échantillons témoins ayant subi les même étapes que les couches correspondantes du composant. Ce processus technologique ainsi optimisé a permis d'obtenir les paramètres physiques et géométriques conduisant aux caractéristiques électriques souhaitées. Deux lots ont été réalisés:

Lot **DPHT C1** donc le but est la réalisation de DPHT avec différentes dimensions et différents paramètres technologiques pour étudier l'influence sur la profondeur de la poche de l'énergie et de la dose de l'implantation.

Lot **DPHT C2:** donc le but est l'étude de la sensibilité de la tenue en tension en fonction de la dose implantée dans la poche.

Les diagrammes de cheminement de réalisation des DPHT C1 et DPHT C2 sont présentées dans l'annexe III.2 et III.3. La disposition des motifs monopoches sur la tranche est présentée dans l'annexe III.4. Pour les lots de tranches DPHT C1 et C2 nous avons retenu les synoptiques dans les figures 3.12 et 3.13 respectivement.

SYNOPTIQUE DE LA DPHT C1

But: Réalisation des DPHT avec différentes dimensions et différents paramètres technologiques

CONFIDENTIEL

Figure 3.12 : *Synoptique de la DPHT C1*

SYNOPTIQUE DE LA DPHT C2

But: Etude de la tenue en tension en fonction de la dose implantée dans la poche

CONFIDENTIEL

Figure 3.13 : Synoptique de la DPHT C2

III.3.1.1 Choix du silicium

Nous utilisons des tranches de silicium FZ de type N (dopées neutrons) d'épaisseur moyenne 350 μm , polissage 1 face de résistivité 70 $\Omega\cdot\text{cm}$ et d'orientation $\langle 111 \rangle$ pour le lot DPHT C1.

Pour lot DPHT C2, ce sont des tranches de silicium FZ de type N (dopées neutrons) d'épaisseur moyenne 280 μm , polissage 2 faces de résistivité 100 $\Omega\cdot\text{cm}$ et d'orientation $\langle 100 \rangle$.

III.3.1.2 Oxydation de champ

Les tranches sont introduites dans le four à parois de quartz à 800° C et subissent une montée lente en température jusqu'à 1050°C (pendant 20 mn) sous atmosphère d'azote. L'oxydation de champ est effectuée en deux étapes: oxydation humide pendant 5h30 mn et oxydation sèche pendant 1h. On utilise l'oxydation humide, plus rapide, pour réaliser l'oxyde épais. Le recuit pendant 30 mn sous azote après l'oxydation permet de densifier l'oxyde en lui procurant une meilleure immunité aux espèces polluantes.

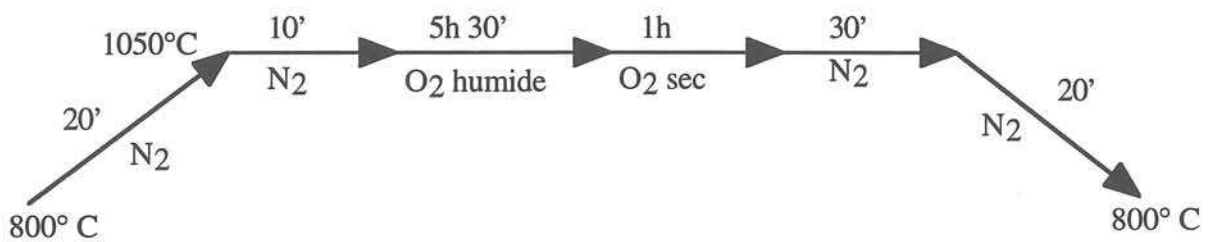


Figure 3.14 : Cycle thermique de l'oxydation de champ.

L'épaisseur d'oxyde de champ obtenue à la fin de cette étape est de 1,4 μm (mesurée par ellipsométrie).

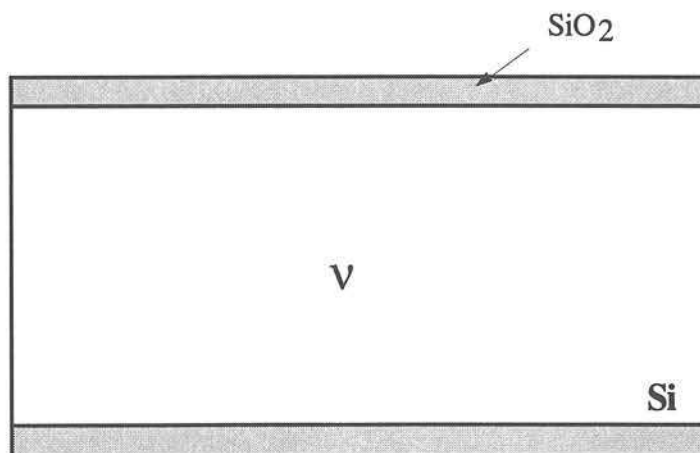


Figure 3.15 : Oxydation de champ.

III.3.1.3 Poche π :

La photolithographie pour l'ouverture de la poche est réalisée à l'aide du masque n°3001 OPCH pour le lot DPHT C1. Ce masque contient trois séries de dimensions de poche, appelés projet "1800 V", "2200 V", "3000 V" avec longueur L_π de la poche correspondantes de 117 μm , 250 μm et 500 μm (figure 3.16). Chaque projet a trois types de poche : normale, pleine et sans poche. Pour le lot DPHT C2 on utilise le masque n°3101 OPCH. Il ne contient plus que les motifs des poches du projet "3000 V".

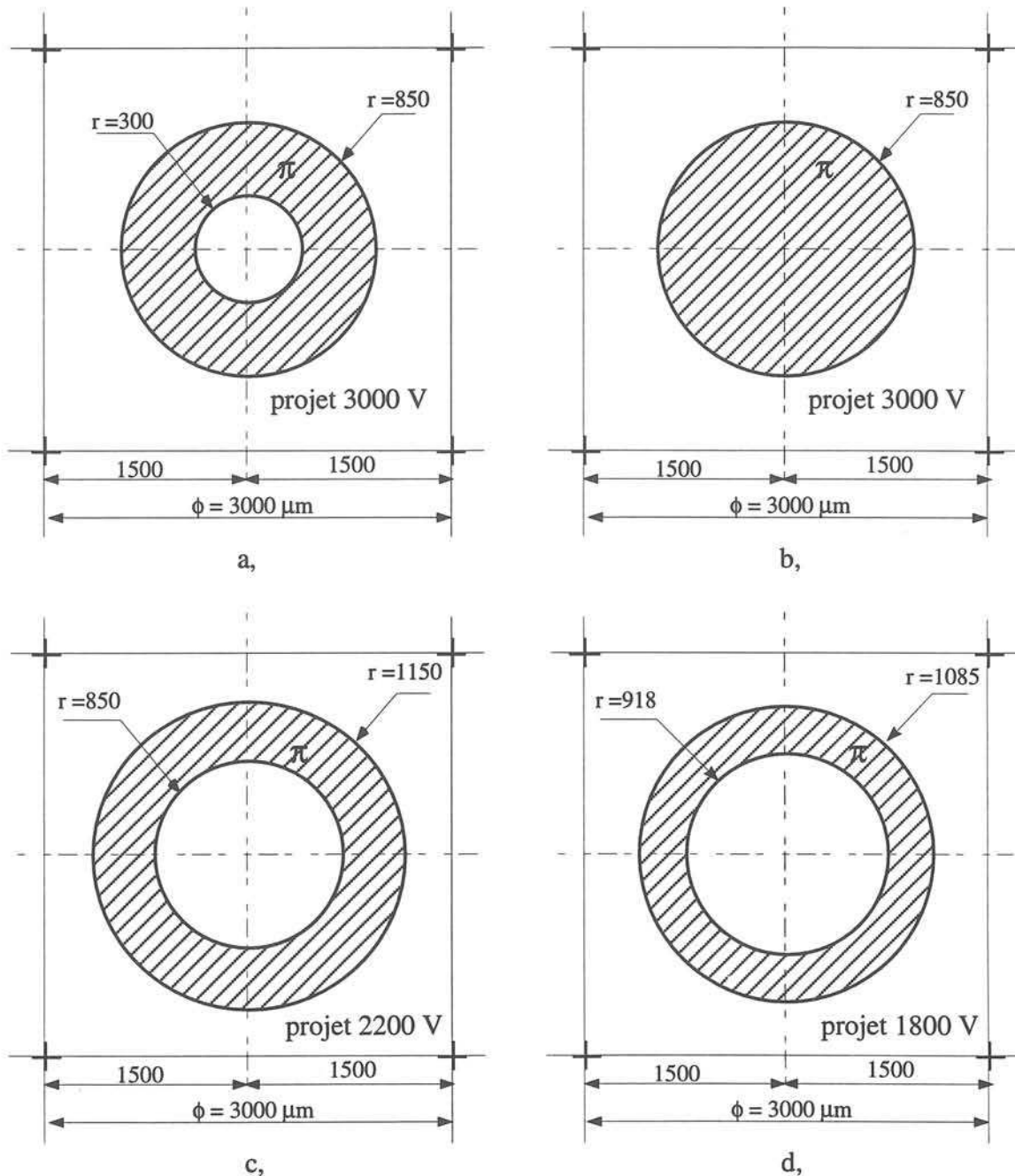


Figure 3.16 : Masque n° 3001 OPCH: poche normale (a), poche pleine (b) du projet 3000 V. Poche normale du projet 2200 V (c) et du projet 1800 V (d).

Pour toutes les étapes photolithographies, on utilise la photorésine positive AZ 1400/27 Shipley pour l'énergie d'implantation de 160 keV et la résine positive Z 1818 pour l'implantation à 360 keV. L'oxyde est gravé par attaque chimique en milieu humide en utilisant une solution d'acide fluorhydrique (HF) dilué.

Il est à noter que sur le plan conception la dose active $Q^*\pi$ de la poche π est contrôlée par la dose implantée dans celle-ci. Si toutes les étapes technologiques sont par ailleurs identiques on peut espérer faire varier la première dans les mêmes proportions que la seconde. L'étude par simulation de la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active de poche π a été effectuée en supposant des profondeurs de jonction de poche constantes.

En pratique, pour d'évidentes raisons de simplification, comme l'on conserve les autres étapes technologiques (le temps et la température de la diffusion, l'énergie de l'implantation), la dose implantée de poche influence directement la profondeur de jonction obtenue. Ainsi comme il est prévisible, la gamme d'implantation choisie pour le lot des tranches DPHT C2 variant de $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ à $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ on obtiendra aussi une variation de $x_j\pi$, la profondeur de poche π . La variable primaire retenue pour cette étude est la dose implantée. Les trois autres paramètres technologiques que sont l'énergie d'implantation, la température de diffusion et la durée de diffusion, ont été maintenues constantes dans toute l'étude. En pratique le cheminement technologique retenu aura pour effet de modifier la profondeur de la poche pour chacune des doses retenues.

Pour toutes les tranches, l'implantation ionique du bore dans la poche π est effectuée en présence de la résine (figure 3.17) pour éviter que des atomes de bore qui auraient été implantés dans l'oxyde ne pénètrent dans le silicium pendant la diffusion de poche. Bien entendu un retrait de la résine est effectué avant celle-ci.

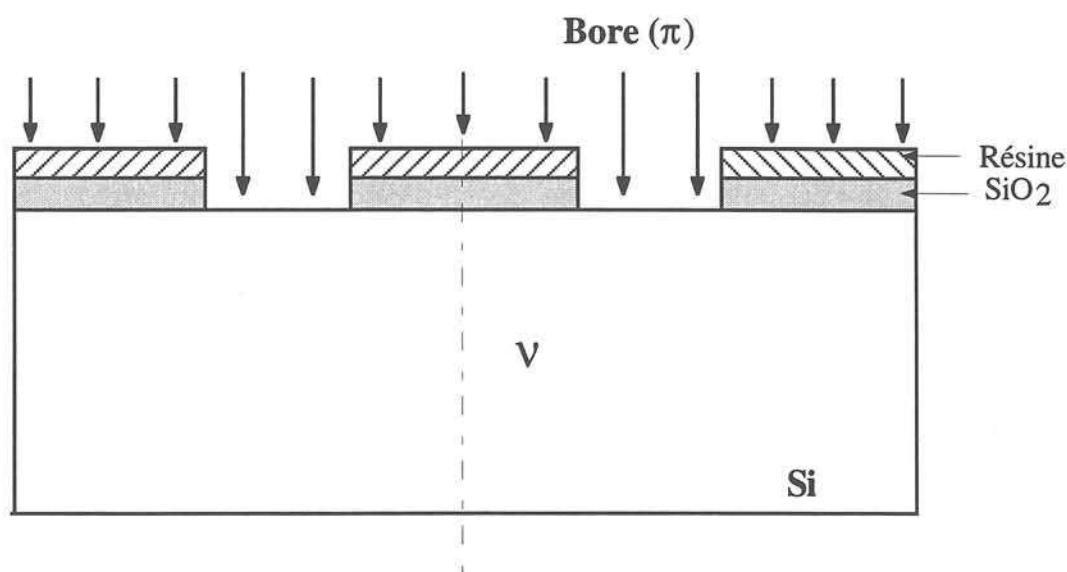


Figure 3.17 : Ouverture et implantation de la poche π .

Pour obtenir une profondeur de poche $x_{j\pi}$ élevée, la diffusion des atomes de bore sera réalisée pendant une longue durée de 100h sous oxygène à haute température de 1130° C pour lot DPHT C1 et de 1160° C pour lot DPHT C2 (figure 3.18).

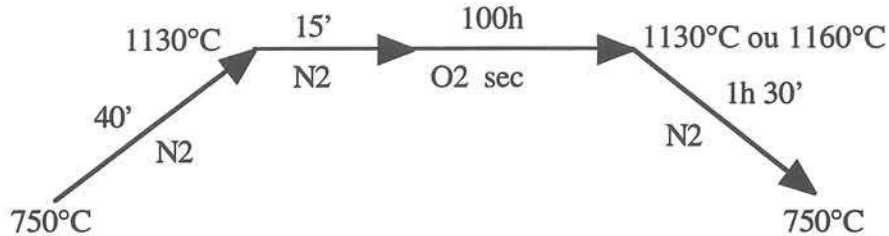


Figure 3.18 : Cycle thermique de diffusion de la poche π pendant 100 h sous oxygène.

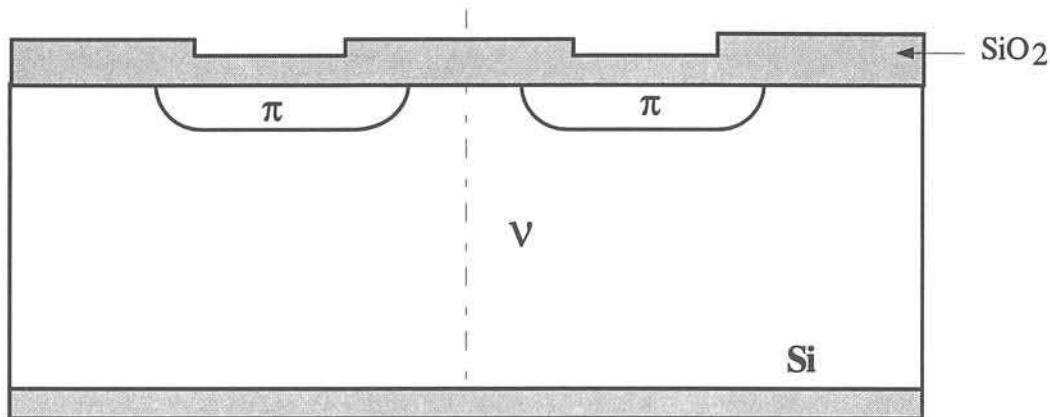


Figure 3.19 : Poche après 100 h de diffusion à 1130° ou 1160°C sous oxygène.

Au cours des 100 h de diffusion de la poche sous oxygène on fait croître en même temps une couche d'oxyde de 1,7 μm au-dessus de la poche π et passer de 1,4 à 2,2 μm l'oxyde resté au-dessus du substrat (figure 3.19). Des motifs test suivent chaque étape comme témoins. Ils ont permis de déterminer les paramètres technologiques de poche et le rendement en bore de l'étape de diffusion.

Les résultats de la caractérisation technologique pour les lots DPHT C1 et DPHT C2 sont donnés dans les tableaux de la figure 3.20 et 3.21 respectivement.

• DPHT C1 :

Les paramètres technologiques obtenus de la poche π du lot DPHT C1 (figure 3.20) mettent en évidence que l'augmentation de l'énergie implantée de 160 keV à 360 keV permet une amélioration du rendement de diffusion de la poche de 30% à 40%.

• Lot DPHT C1: 8 tranches Si ZF; $\rho_V = 70 \Omega \cdot \text{cm}$ type N; $e \# 350 \mu\text{m}$

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Tranches N°	111 R: 1; 2	221R: 3; 4	111 λ : 5; 13	221 λ : 7; 8
Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$)	73	73	70	70
Dose d'implantation de poche (cm^{-2})	$4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$
Energie (keV)	160	360	160	360
Diffusion de la poche π	Confidentiel Confidentiel			
Profondeur de la poche $x_j \pi$ (μm)	8,25	7,7	8,17	8,24
Concentration en surface $C_{S\pi}$ (cm^{-3}) (SRP)	$2 \cdot 10^{15}$	$9 \cdot 10^{14}$	$1,25 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$
Résistance carrée de la poche R_{\square} ($\text{k}\Omega$)	10,8	11,8	10,5	10,9
Dose active de la poche π : $Q^*_{\text{act}} = 1,33 \cdot 10^{16} / R_{\square}$ (cm^{-2})	$1,2 \cdot 10^{12}$	$1,13 \cdot 10^{12}$	$1,27 \cdot 10^{12}$	$1,22 \cdot 10^{12}$
Rendement technologique (%) (Bore actif / Bore implanté)	30,5	37,7	31,7	40,7

Figure 3.20 : Résultats des caractéristiques technologiques de la poche π du lot DPHT C1

• Lot DPHT C2 : 14 tranches Si ZF; $\rho_V = 100 \Omega \cdot \text{cm}$ type N; $e \# 280 \mu\text{m}$							
RESULTATS EXPERIMENTAUX							
N° des tranches	1 - 15	3 - 4	5 - 21	7 - 8	9 - 10	11 - 12	13 - 14
Dose d'implantation (cm^{-2})	$2 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$4,5 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{12}$
Energie d'implantation (keV)	CONFIDENTIEL						
Diffusion de la poche π	CONFIDENTIEL						
Profondeur de jonction $x_{j\pi}$ (μm)	11,8	12,7	13,6	14,0	14,3	14,7	15,1
Concentration de surface $C_{S\pi}$ (cm^{-3}) (SRP)	$7 \cdot 10^{14}$	$1,2 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,7 \cdot 10^{15}$	$1,8 \cdot 10^{15}$	$2 \cdot 10^{15}$
Résistance carrée de la poche π ($\text{k}\Omega/\square$)	17,4	12,7	11,8	9,0	8,6	7,3	6,3
Dose active de poche π (cm^{-2})	$0,76 \cdot 10^{12}$	$1,05 \cdot 10^{12}$	$1,13 \cdot 10^{12}$	$1,48 \cdot 10^{12}$	$1,55 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{12}$	$2,1 \cdot 10^{12}$
Rendement technologique (%) Bore actif / Bore impl.	38	42	38	42	38	40	42

Figure 3.21 : Résultats des caractéristiques technologiques de la poche π de lot DPHT C2

• DPHT C2 :

A partir des résultats expérimentaux ci - dessus obtenus pour le lot DPHT C2 (figure 3.21) on voit que le rendement de processus de diffusion de la poche à 1160°C sous O_2 pendant 100h est d'environ 40%. Il est clair que la température est un facteur important pour augmenter la profondeur de la poche et le rendement de l'implantation. Ainsi, avec la même dose implantée de $4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et l'énergie de 160 keV la profondeur de la poche π passe de $8 \mu\text{m}$ à $14 \mu\text{m}$ et le rendement Bore actif / Bore implanté de 30% à 40% en augmentant la température de diffusion de 1130°C à 1160°C .

Les profils du bore dans la poche π définis par la méthode SRP pour les deux doses implantée: $3,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et $5,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ sont présentés figure 3.22.

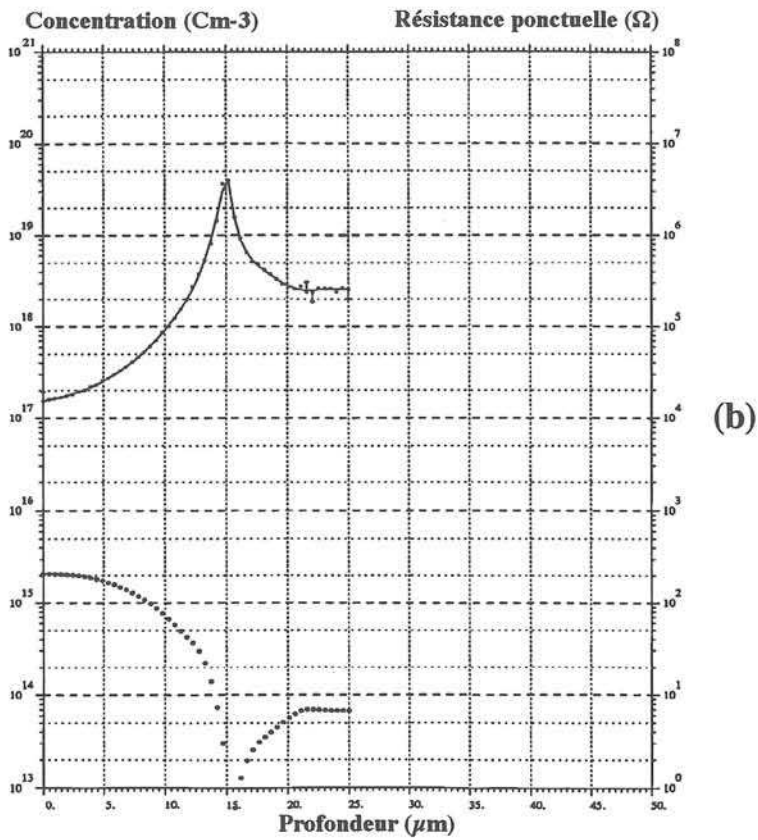
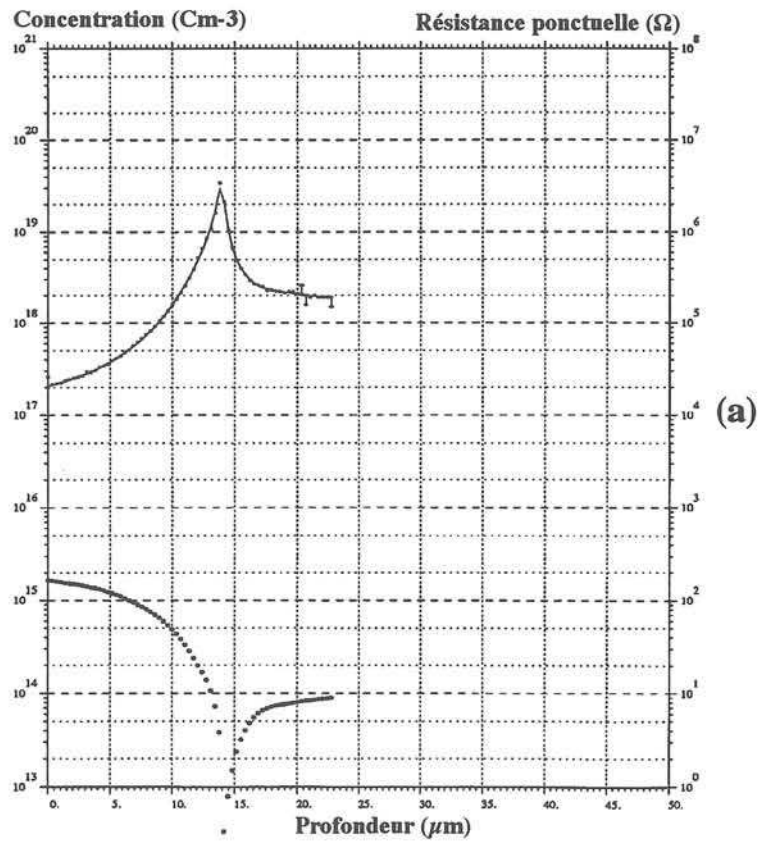


Figure 3.22 : Résultats expérimentaux xj_{π} et $C_{S\pi}$ obtenus par méthode SPR pour 2 doses d'implantation de la poche π . Courbe (a) $3,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Courbe (b) $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

III.3.1.4 Couche P^+

Pour l'ouverture de la couche P^+ on utilise le masque 3002 DIFP correspondant comme l'ouverture de la poche aux 3 séries de projets c'est-à-dire "1800 V", "2200 V" et "3000 V" avec pour rayons d'ouverture P^+ de 968 μm , 900 μm et 350 μm respectivement. Les 3 projets de la couche P^+ sont présentées figure 3.23.

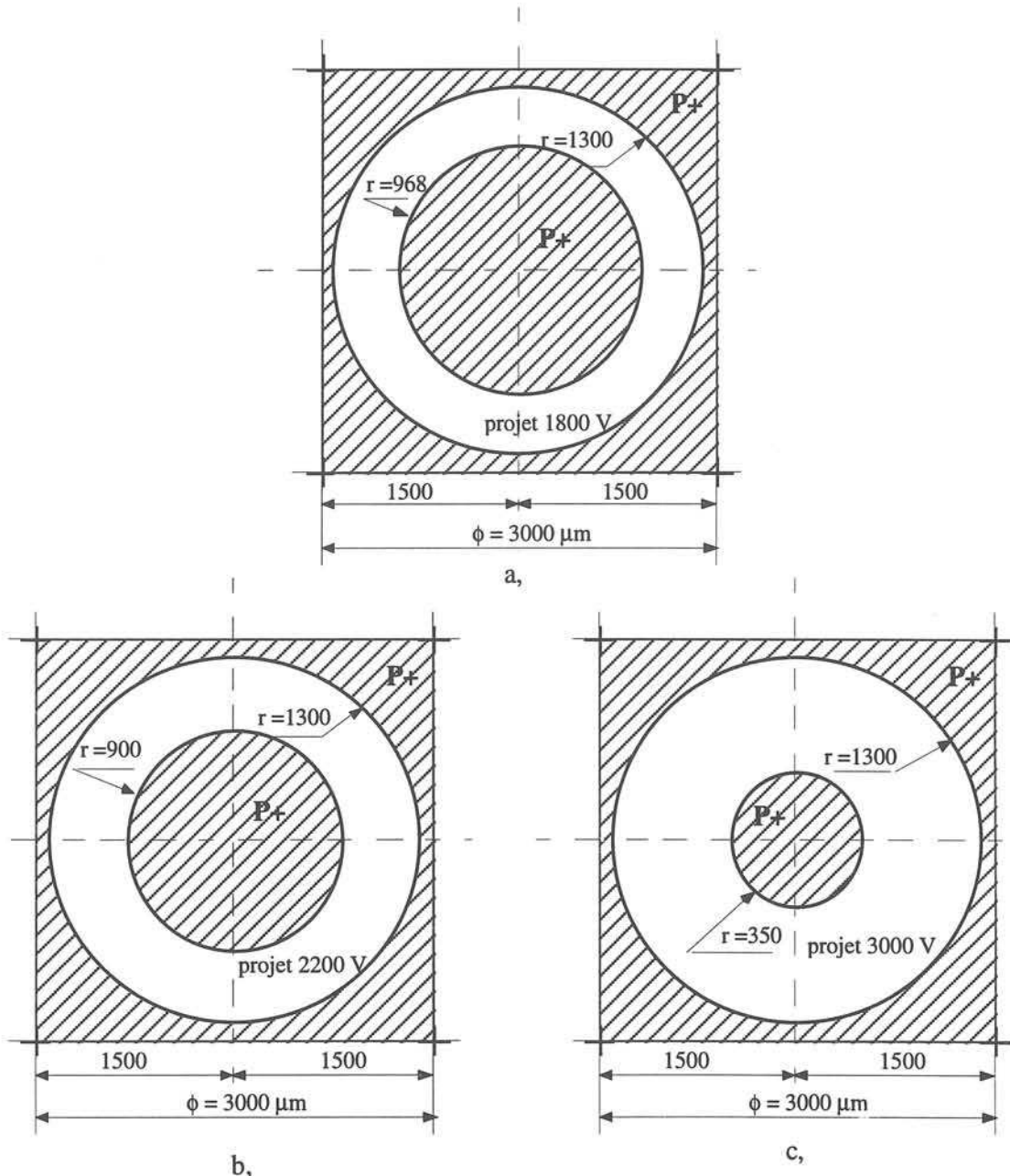


Figure 3.23 : Masque N° 3002 DIFP pour l'ouverture de la couche P^+ des projets :
 "1800 V" (a) $r_{P^+} = 968 \mu\text{m}$; "2200 V" (b) $r_{P^+} = 900 \mu\text{m}$; "3000 V" (c) $r_{P^+} = 350 \mu\text{m}$.

Ensuite pour éviter l'exodiffusion générale et croisée surtout du phosphore pour la filière "rapide CIME" on fait croître une couche d'oxyde fine.

Cette oxydation de préimplantation est dure pendant 70 mn à 1050° C. L'épaisseur obtenue est de 0,1 μm .

L'implantation du Bore pour la couche P⁺ (figure 3.24) est réalisée à travers cette couche d'oxyde avec une énergie de 160 keV pour une dose de $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

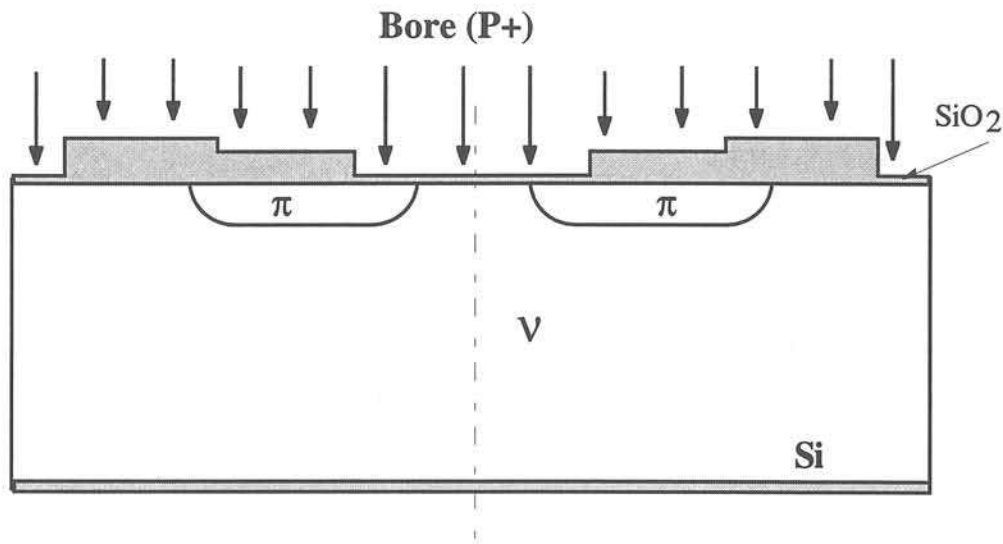


Figure 3.24 : Ouverture et implantation de P⁺

La diffusion du P⁺ est réalisée à 1130° C pendant 5h sous oxygène pour la filière normale (λ) (figure 3.25a) ou pendant 30 mn sous oxygène suivie de 4,5h sous azote pour la filière "rapide CIME" (R) (figure 3.25b). La profondeur moyenne du P⁺ est de 4 μm et sa concentration en surface de 10^{19} cm^{-3} .

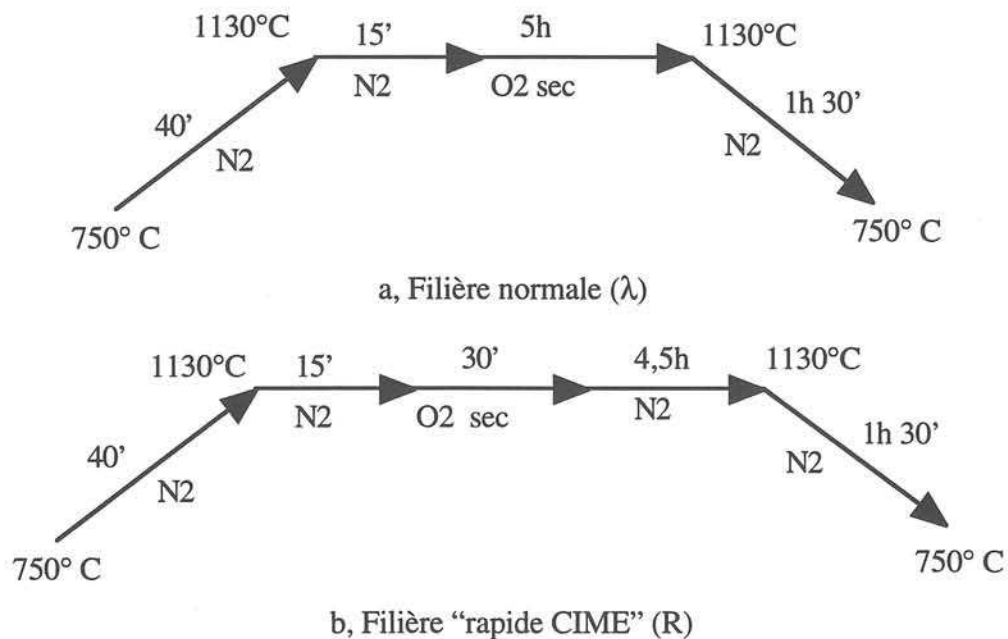


Figure 3.25 : Cycle thermique de diffusion de la couche P⁺

III.3.1.5 Couche N^+ face avant (AV) et arrière (AR)

A cette étape les tranches de la filière "rapide CIME" (R) ont une implantation de phosphore à travers l'oxyde sur la face arrière avec une dose de $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ et une énergie de 130 keV (voir figure 3.26) pour former un contact ohmique entre l'aluminium et le substrat v de la face arrière.

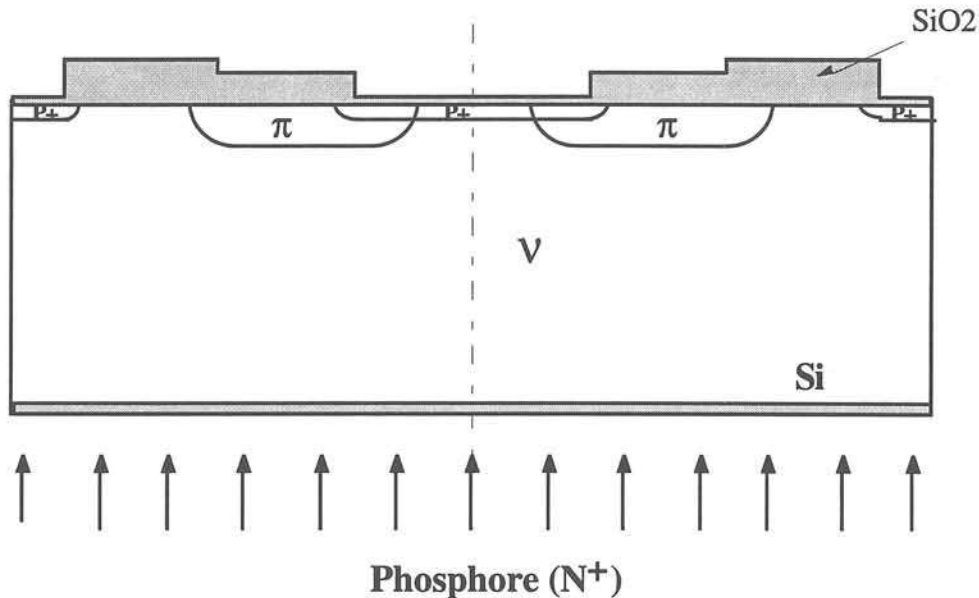


Figure 3.26 : Implantation de N^+ face arrière (filière "rapide CIME")

Les tranches de la filière normale (λ), reçoivent ensuite deux implantations ioniques de phosphore. La première est l'implantation de phosphore sur la face avant avec une dose de $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ et une énergie de 100 keV pour former une couche N^+ périphérique dans la couche P^+ extérieur en utilisant le masque N° 3003 DIFN (figure 3.27).

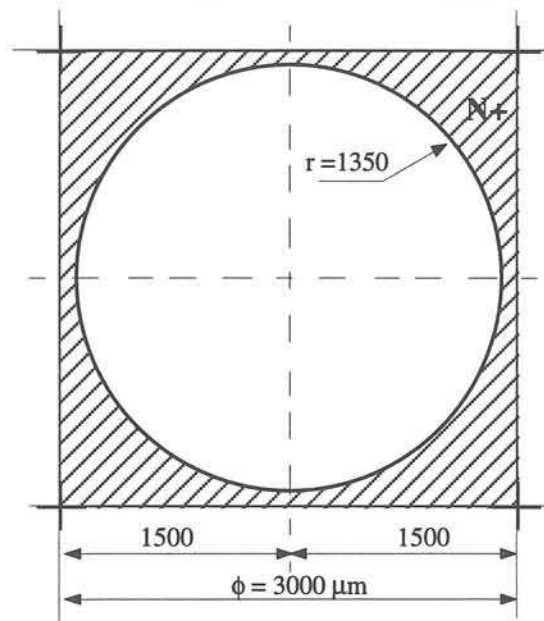


Figure 3.27 : Masque N° 3003 DIFN pour l'ouverture de la couche N^+ face avant

La deuxième est sur la face arrière pour avoir un contact ohmique avec mêmes dose et énergie que sur la face avant. La figure 3.28 représente ces deux implantations.

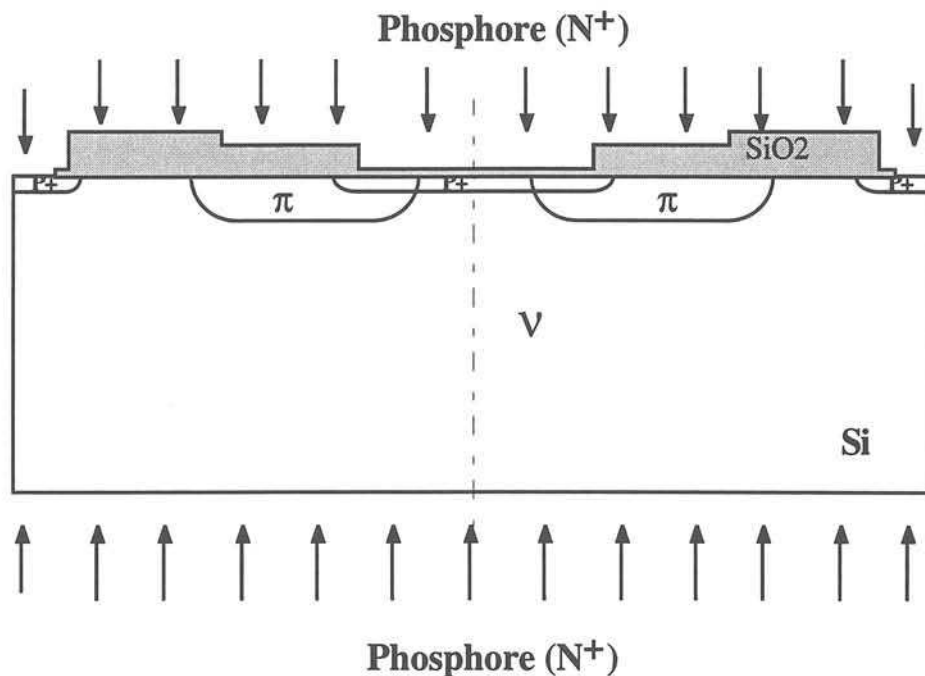


Figure 3.28 : Ouverture et implantation de N^+ face avant et arrière (filière normale)

Les tranches de deux filières suivent alors un recuit à 1025°C pendant 30 mn sous azote. La concentration obtenue en surface du phosphore des faces avant et arrière est de l'ordre de $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

III.3.1.6 Ouverture des contacts et métallisation

L'ouverture des contacts face avant se fait avec le masque n° 3004 OCON figure 3.29a. Une couche d'aluminium de $2 \mu\text{m}$ est ensuite déposée sur les tranches par évaporation sous vide (par effet Joule). Pour former le contact Anode, les tranches métallisées sont photogravées en utilisant le masque n° 3005 GALU figure 3.29b: l'aluminium est ensuite attaqué par voie humide à l'aide de la solution H_3PO_4 à 45°C .

Le contact Cathode est effectué par le même principe de métallisation sur la face arrière. Pour avoir un bon contact aluminium / silicium les tranches subissent ensuite un traitement thermique à 450°C pendant 30 mn sous atmosphère N_2 .

La coupe schématique d'une DPHT après gravure aluminium pour les contacts Anode et Cathode est présentée figure 3.30.

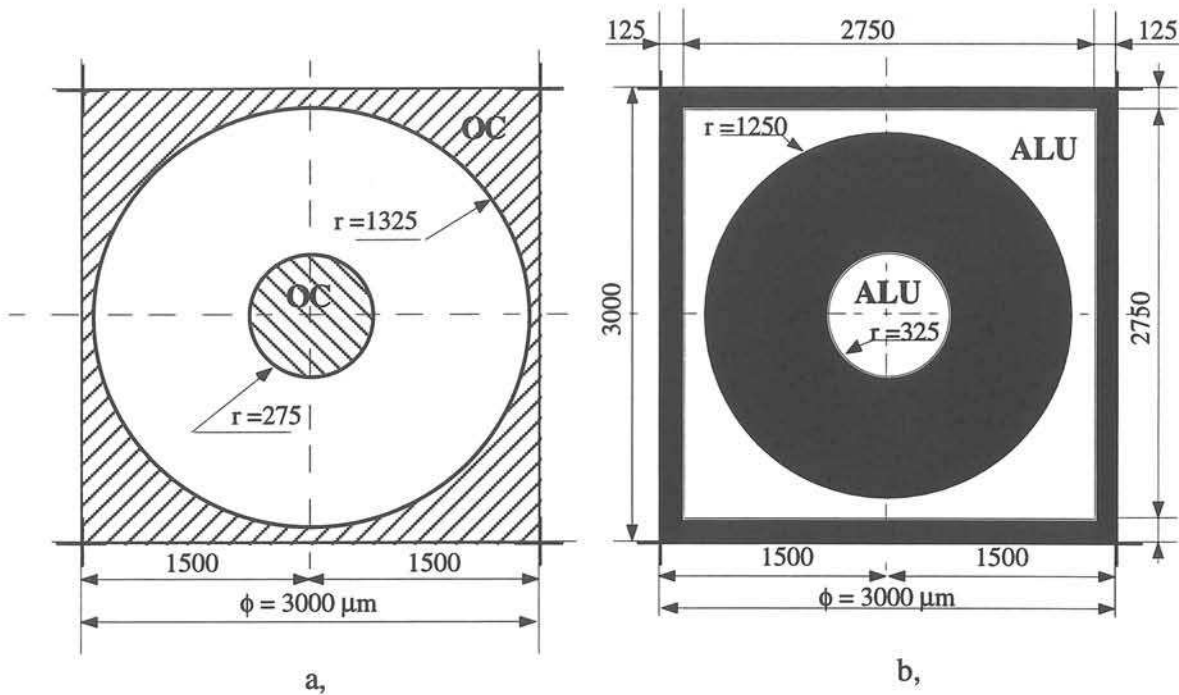


Figure 3.29 : Masques 3004 OCON (a) et 3005 GALU (b) pour ouverture des contacts et gravure aluminium

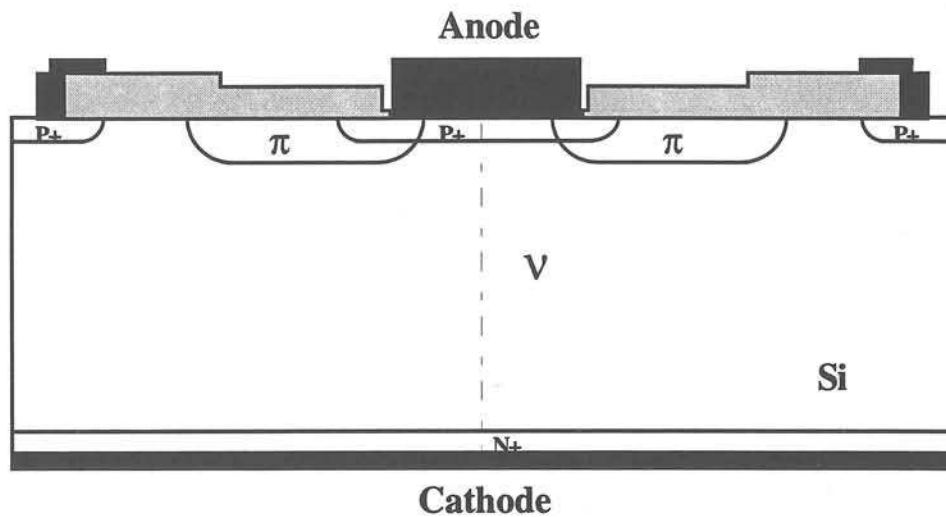


Figure 3.30 : Coupe schématique de DPHT après gravure aluminium pour l'anode

Les photographies en phase finale des 3 diodes à poche haute tension correspondant aux 3 projets se trouvent figure 3.31.

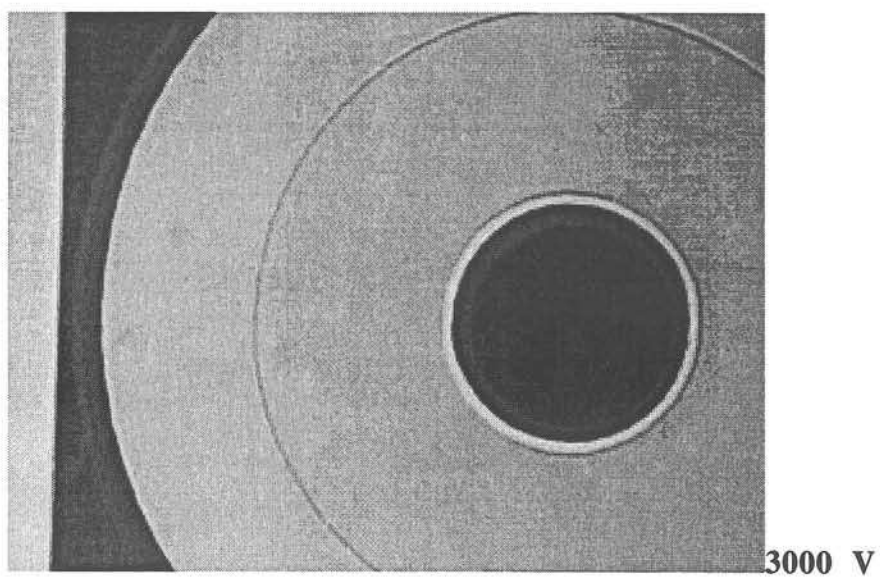
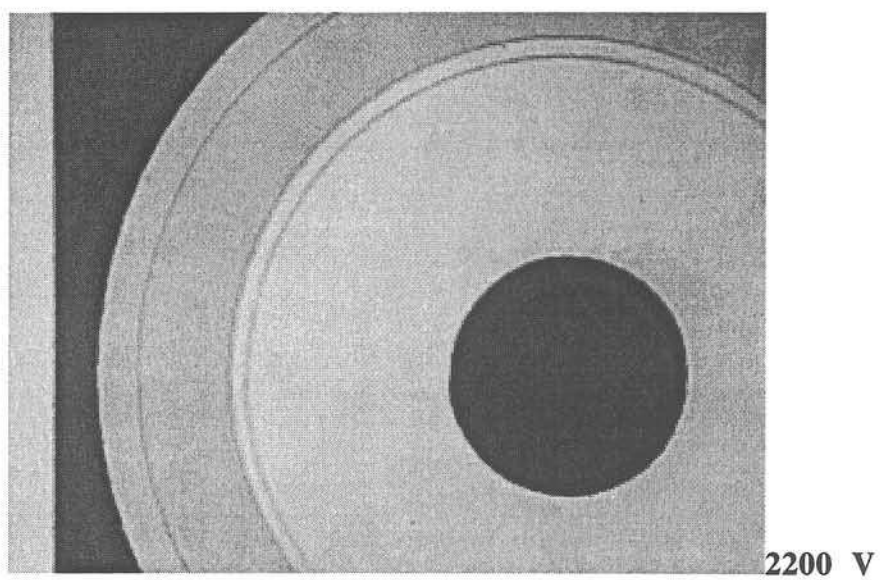
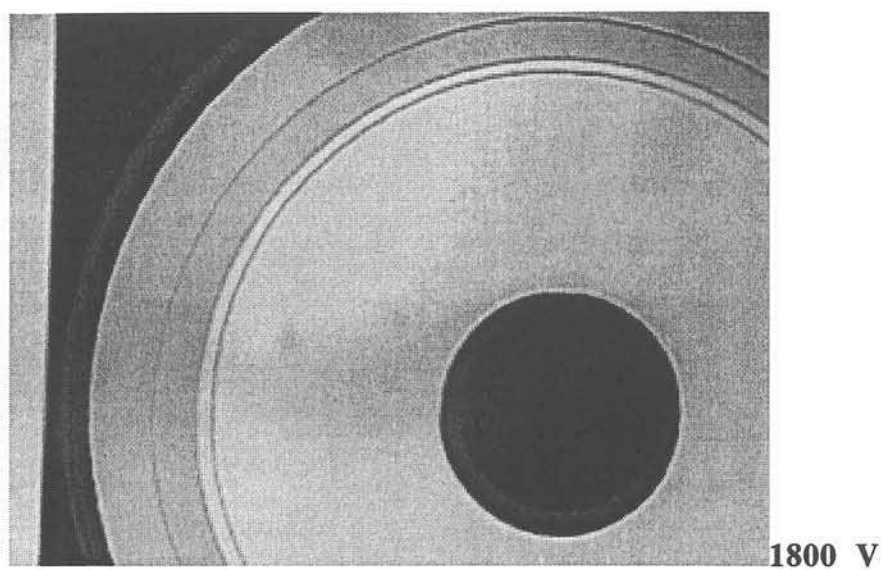


Figure 3.31: Photographie des diodes à poche haute tension des 3 projets

III.3.2 Tensions de claquage obtenues

Les résultats expérimentaux de la tenue en tension pour les diodes de lot DPHT C1 sont reportés dans le tableau de la figure 3.32.

Lot DPHT C1: 8 tranches Si ZF; $\rho_V = 70 \Omega \cdot \text{cm}$ type N; $e \# 350 \mu\text{m}$ RESULTATS EXPERIMENTAUX				
Tranches N° Résistivité ($\Omega \cdot \text{cm}$)	111 R: 1; 2 73	221R: 3; 4 73	111 λ : 5; 13 70	221 λ : 7; 8 70
Dose d'implantation de poche (cm^{-2})	$4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$
Energie (keV)	160	360	160	360
Durée de diffusion à 1130° C (h)	100	100	100	100
Tension de claquage maximale (V) (testée à 0,5 mA après métall.) pour les motifs des 3 projets: <div> "3000 V" "2200 V" "1800 V" </div>	1645 1580 1220	1315 1300 1040	1620 1280 1090	1605 1245 1090
Tension de claquage médiane (V) (testée à 0,5 mA après métall.) pour les motifs des 3 projets: <div> "3000 V" "2200 V" "1800 V" </div>	<1515> <1505> <1175>	<1290> <1208> <930>	<1560> <1150> <980>	<1550> <1130> <1030>

Figure 3.32 : Résultats expérimentaux de la tenue en tension des diodes du lot DPHT C1

A partir des résultats expérimentaux de lot DPHT C1 nous avons tracé la courbe de variations de la tension de claquage en fonction de la longueur de poche $L\pi$ (figure 3.33).

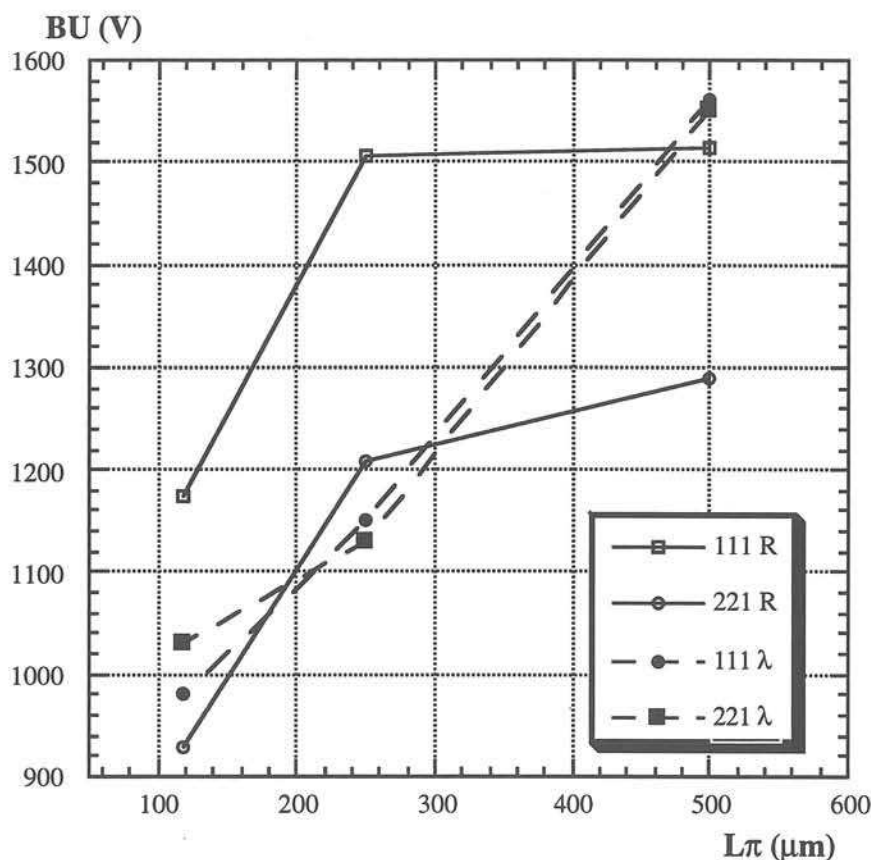


Figure 3.33 : Résultats expérimentaux de la tenue en tension en fonction de la longueur de poche π pour les diodes de deux filières "normale" (λ) et "rapide CIME" (R).

Nous remarquons que comme la profondeur de jonction, la longueur de la poche π est aussi un facteur déterminant pour l'optimisation de la périphérie de poche. La tension de claquage croît avec la longueur de la poche. A titre d'exemple pour le lot des diodes 111R avec la poche π de profondeur $8,25 \mu\text{m}$, de longueur $250 \mu\text{m}$ projet "2200 V" permet une augmentation de la tension de claquage de 425 V par rapport à une poche de même profondeur de poche # $120 \mu\text{m}$ projet "1800 V" (figure 3.33).

Comme la courbe obtenue par simulation, les courbes expérimentales des lots 111R et 221R ne sont pas linéaires. En effet, après augmentation de la longueur $L\pi$ de $250 \mu\text{m}$ (projet "2200 V") à $500 \mu\text{m}$ (projet "3000 V") on gagne sur la tension de claquage seulement, 10 V pour le lot 111R et 82 V pour le lot 221R.

Pour les diodes du lot DPHT C2, les résultats expérimentaux de la tension de claquage sont présentés dans le tableau de la figure 3.34. La caractéristique de la tenue en tension en fonction de la dose active de poche π de ces diodes est présentée figure 3.35

<p>• Lot DPHT C2 : 14 tranches Si ZF; $\rho_V = 100 \Omega \cdot \text{cm}$ type N; $e\# 280 \mu\text{m}$</p> <p>RESULTATS EXPERIMENTAUX</p>							
N° des tranches	1 - 15	3 - 4	5 - 21	7 - 8	9 - 10	11 - 12	13 - 14
Dose d'implantation (cm^{-2})	$2 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^{12}$	$4 \cdot 10^{12}$	$4,5 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{12}$
Énergie d'implantation (keV)	160						
Diffusion de la poche	100 heures sous O_2 à 1160°C						
Tension de claquage max. (V). Testée à 0,5 mA avant métallisation	1230	1800	2460	2450	1450	1120	900
Tension de claquage médiane (V). Testée à 0,5 mA avant métallisation	1100	1600	2160	2300	1300	1050	850
Tension de claquage médiane (V). Testée à 0,5 mA après métallisation	1270	1720	2250	2530	1780	1350	1240

Figure 3.34 : Récapitulatif de la tension de claquage du lot DPHT C2

Les résultats expérimentaux reportés dans le tableau de la figure 3.34 et à la figure 3.35 confirment que comme les courbes obtenues en simulation, la courbe expérimentale de la figure 3.35 met bien en évidence l'existence d'une dose optimale implantée ($3,25 \pm 0,25$) 10^{12} cm^{-2} correspondant à une tension de claquage maximale de 2300 V pour le substrat N de $100 \Omega \cdot \text{cm}$. Par ailleurs, la phase de diffusion effectuée sous oxygène présente, avec les caractéristiques définies précédemment, un rendement de bore actif (dose active / dose implantée) d'environ 40%. On en déduit que la dose active optimale de bore est égale à $(1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Il est remarqué que l'écart constaté entre les doses optimales simulée et expérimentales peut être lié simplement à la méthode de détermination expérimentale de la dose active.

On retrouve aussi les deux modes de comportement de la terminaison, suivant que la dose active de la poche se trouve au dessus ou en dessous de la dose active optimale.

L'identification des échantillons obtenus a confirmé l'augmentation de la profondeur de poche induite par l'augmentation de la dose implantée. Malgré cet effet secondaire, la seconde partie de la courbe présente toujours une décroissance importante du pouvoir de tenue en tension des dispositifs concernés. De manière générale, ces résultats expérimentaux confirment en tous points l'étude simulation menée dans le chapitre II.

En conclusion, expérimentation et modélisation montrent bien que $Q^*_{\pi T}$, la dose implantée pour un processus technologique donné, contrôle la tenue en tension de la périphérie. Il va de soi que d'autres variables peuvent compléter l'action de $Q^*_{\pi T}$. Quoique déterminante elle n'est pas la seule. Il y a au moins $x_{j\pi}$ et CS_{π} à situer également en première ligne.

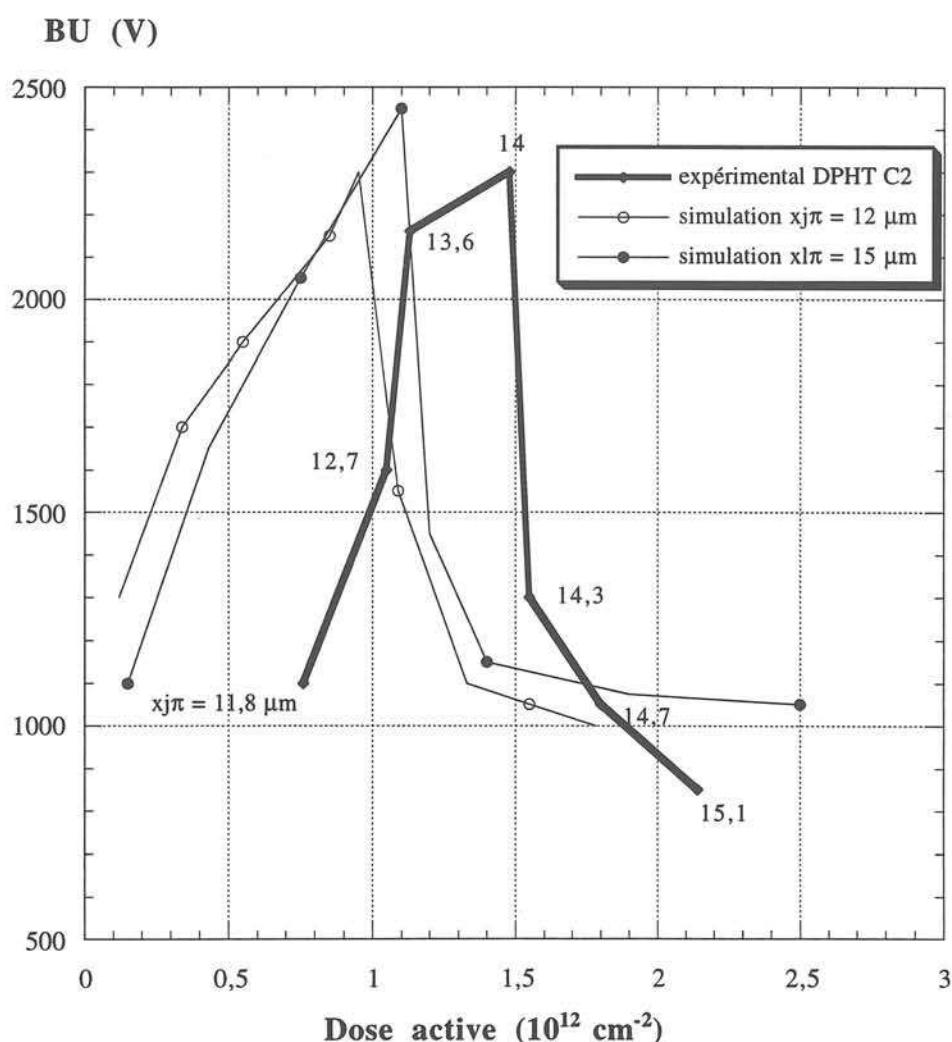


Figure 3.35 : Résultats simulés (chiffres extraits de figure 2.5 à $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$ et à $x_{j\pi} = 15 \mu\text{m}$) et résultats expérimentaux (chiffres extraits des figures 3.21 et 3.34) de la tenue en tension de claquage médiane (testée à 0,5 mA avant métallisation) en fonction de la dose active pour le substrat $100 \Omega.\text{cm}$ type N.

CONCLUSION DU CHAPITRE III

Nous avons présenté dans ce chapitre l'optimisation du processus technologique permettant conception et réalisation de périphérie PLANAR haute tension ($U > 2 \text{ kV}$). La périphérie en poche est compatible avec la filière planar.

Dans la première partie nous en avons développé l'optimisation des étapes technologiques à l'aide du logiciel ATHENA/SUPREME 4. A ce stade nous avons essentiellement étudié l'influence des paramètres sur le rendement de procédé de diffusion de la poche.

Ensuite, nous avons détaillé la description des étapes de réalisation des diodes en poche à haute tension afin de valider les études de la sensibilité de tenue en tension de cette périphérie. Chacune des premiers a été illustrée par les différents niveaux de masque et la coupe du dispositif.

La dernière partie a été consacrée à l'analyse de caractérisation des tensions de claquage pour chaque lot de DPHT.

A partir des résultats obtenus nous avons confirmé que la périphérie en poche permet d'obtenir des tensions de claquages proches de la valeur idéale de la tension de claquage de la jonction plane à condition que la dose active de celle - ci soit optimisée. Par ailleurs, sur un plan pratique, ce paramètre est difficilement contrôlable avec précision car fortement dépendant du diagramme de cheminement de réalisation.

L'utilisation industrielle des poches ne peut être envisagée qu'en développant des améliorations permettant de réduire cette sensibilité. Différentes publications [8] [9] dans ce domaine font état d'une réalisation de périphérie planar non homogène.

Le chapitre suivant propose une structure bipoche. Initiée dans la continuité de la présente étude de l'optimisation, elle doit permettre de mieux contrôler les différents champs électriques "sensibles" de ce type de terminaison, et en final de réduire très notablement la sensibilité de la tenue en tension de ce type de terminaison vis-à-vis de la dose active de la poche.

CHAPITRE IV

Chapitre IV

OPTIMISATION ET REALISATION D'UNE PERIPHERIE PLANAR BIPOCHE HAUTE TENSION

INTRODUCTION

A partir des résultats obtenus dans l'étude et la réalisation de la périphérie planar monopoché (chapitres II et III) on peut faire deux remarques.

La première est que les caractéristiques de la tenue en tension de cette périphérie restent très sensibles à la dose active implantée dans la poche.

La deuxième est que l'augmentation de la profondeur de jonction de la poche ($x_j\pi$) améliore la tenue en tension de la périphérie. Malheureusement l'augmentation de la profondeur de jonction induit (de par les caractéristiques technologiques des matériaux utilisés : silicium et bore) une étape de diffusion longue et coûteuse en énergie.

Conséquence évidente, pour minimiser cette difficulté et aussi rendre le processus "moins pointu" (voir les résultats obtenus dans l'étude monopoché des chapitres II et III) il est nécessaire de bien maîtriser la dose active dans la poche pour contrôler la distribution du champ électrique et ce avec des $x_j\pi$ aussi réduits que possible.

Ce chapitre a pour but, dans cette perspective, de développer une structure de poche non homogène dite "bipoché" afin de diminuer la sensibilité de la tenue en tension par rapport à la dose active implantée.

Dans la première partie nous résumerons la synthèse bibliographique sur la périphérie haute tension de type "poche monojonction" non homogène.

Ensuite, nous présenterons les résultats concernant l'optimisation de la structure bipoché effectuée à l'aide du module PISCES du logiciel ATLAS.

Enfin, dans la dernière partie, après avoir décrit les principales étapes du processus de réalisation de la structure bipoché, nous exposerons les résultats expérimentaux sur la tenue en tension des DPHT bipoché.

ETAT DE L'ART

Pour réaliser un compromis entre les valeurs du champ électrique au niveau de la courbure de la jonction et en surface, on décrit dans les publications quelques structures de terminaison réalisées par multi-implantation latérale [43, 45].

La structure de terminaison proposée par V.A.K.TEMPLE et W.TANTRAPORN dans [43] (figure 4.1) est réalisée par une double implantation. Elle consiste à effectuer une

implantation à forte dose (Q_B) autour de la jonction principale P^+ et à la prolonger par une deuxième (Q_S) à plus faible dose. Les valeurs maximales du champ électrique en surface pour les points 1, 2, 3 dépendent des valeurs des doses Q_B et Q_S .

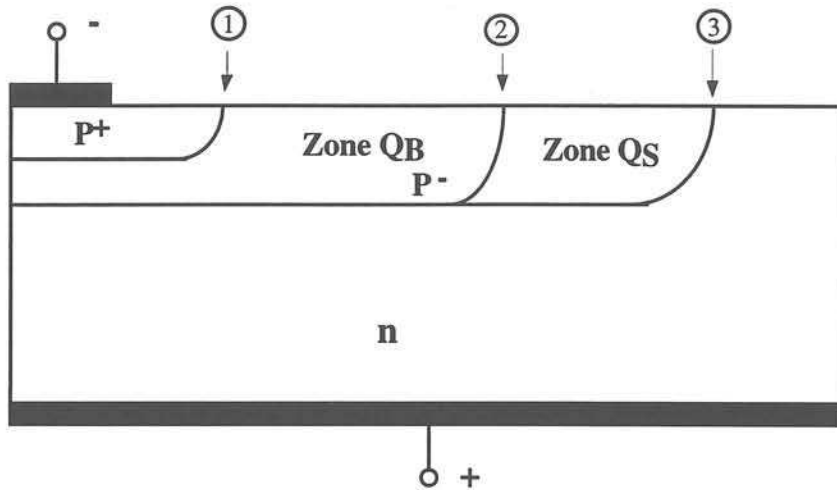


Figure 4.1 : Structure double implantation proposée par V.A.K.TEMPLE et W.TANTRAPORN [43]

On peut penser que si l'on augmente le nombre d'implantations, les pics du champ électrique vont augmenter en conséquence, et leur chevauchement va conduire à une égalisation du champ comme la structure présentée par HAMZA YILMAZ [45] dans la figure 4.2.

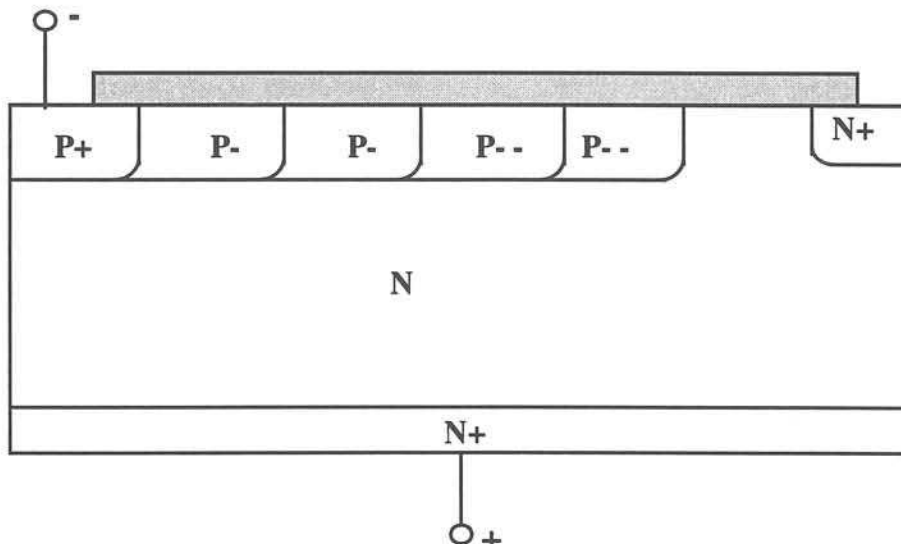


Figure 4.2 : Structure périphérique multi régions monojonction proposée par HAMZA YILMAZ [45]

Si par ailleurs on souhaite une structure avec des doses implantées diminuant quand on s'éloigne de la jonction principale, il est possible de réaliser des diffusions de profondeurs

différentes par redistribution. Cette technique de variation latérale du dopage a été proposée par R.STENGL, U.GOSELE et al. dans [42]. Elle adoucit la courbure de la jonction principale et la rend très graduelle. Ceci est favorable pour obtenir une tension de claquage proche de la tension claquage pour une jonction plane. Elle consiste à réaliser une implantation unique à travers un masque percé de trous de différentes grosseurs. La dose implantée, fonction de la grosseur de chaque trou, subit ensuite une diffusion de redistribution et conduit à un profil dont l'allure est illustrée figure 4.3

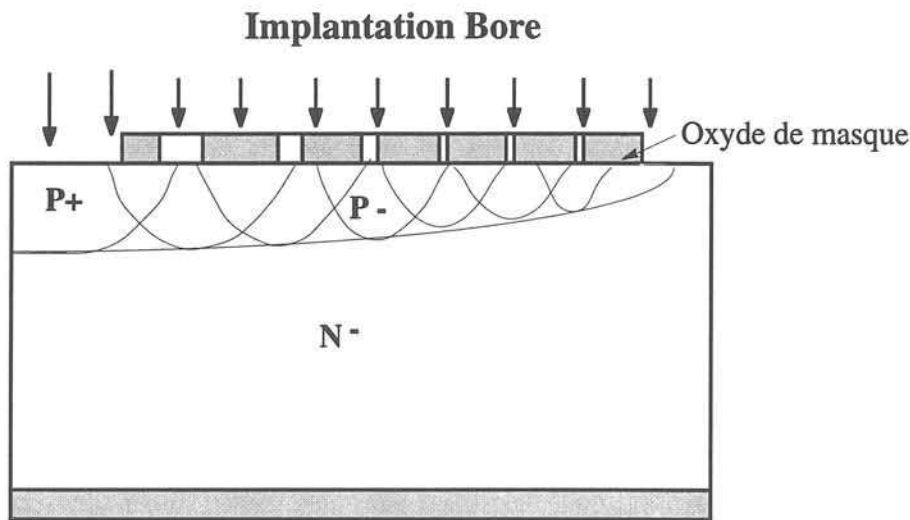


Figure 4.3 : Allure du profil latéral obtenu par la technique Variation Latérale du Dopage (VLD) proposée par R.STENGL, U.GOSELE et al. dans [42].

Parmi ces structures du type poche non homogène nous en avons choisi une à deux zones de dopage différents appelée bipoche par la suite. Initiée dans la continuité des études de périphérie, la structure bipoche doit permettre de mieux contrôler les différents champs électriques "sensibles" et en finale grâce à ce type de terminaison de réduire notablement la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active de la poche.

IV.1 OPTIMISATION D'UNE PERIPHERIE PLANAR BIPOCHE

IV.1.1 Périphérie bipoche - principe

A partir des résultats de simulation pour la périphérie monopoeche nous avons remarqué que le point de claquage dans la structure de poche optimale se situe à la zone d'interface P^+/π où le gradient de dopage dans cette région semble être plus grand qu'ailleurs avec simultanément un faible rayon de courbure. Pour diminuer le gradient de dopage dans ce zone et donc augmenter la tension de claquage, à partir de la structure monopoeche optimale nous ajoutons une implantation dans la partie intérieure de la poche π tout autour de la couche P^+ . Il en résulte que la poche est devenue non uniforme selon la direction parallèle au plan de l'interface Si/SiO₂. Nous considérons la nouvelle structure comme deux poches juxtaposées, ou bipoche, dont la partie extérieure est nommée poche π_1 et la partie intérieure est nommée poche π_2 . On va la simuler avec pour base une des six structures monopoches optimisées présentées dans le paragraphe §II.2.2 du chapitre II pour la périphérie monopoeche et choisie à titre d'exemple, en utilisant le logiciel ATLAS/PISCES.

Les dimensions principales de la périphérie bipoche avec ses paramètres représentatifs sont donnés figure 4.4. Pour pouvoir comparer les deux structures monopoeche et bipoche ainsi que simplifier la simulation, on conserve les mêmes paramètres choisis pour la périphérie monopoeche, notamment la longueur totale de la périphérie c'est à dire la somme $L_{\pi T} = L_{\pi 1} + L_{\pi 2} = L_{\pi}$ et égale à 500 μm , les profondeurs des poches π_1 et π_2 ($x_{j\pi 1}$, $x_{j\pi 2}$) sont constantes et égalent à 12 μm . Nous utilisons le même silicium type N (dopé au phosphore) de résistivité 100 $\Omega\cdot\text{cm}$, d'orientation $\langle 100 \rangle$ avec une épaisseur de 280 μm afin d'avoir une structure non tronquée.

Comme dans l'étude de la périphérie monopoeche nous supposons dans l'ensemble de l'étude que les profils de dopage de la couche P^+ et des poches π_1 et π_2 sont Gaussiens. Pour la conception de la partie centrale, sont retenus les mêmes paramètres que la périphérie monopoeche c'est à dire :

- $r_{P^+} = 350 \mu\text{m}$
- $x_{jP^+} = 5 \mu\text{m}$
- $\Delta P^+\pi = 50 \mu\text{m}$

L'ouverture masque pour implanter les poches est évidemment de $L_{\pi T} + \Delta P^+\pi = 550 \mu\text{m}$

Les autres grandeurs géométriques et technologiques comme épaisseurs de l'oxyde et de nitrure, épaisseur et largeur de zone v sont maintenues constantes et égales aux données fournies ci-dessous.

- $e_{\text{nitrure}} = 1,5 \mu\text{m}$
- $e_{\text{SiO}_2} = 1,5 \mu\text{m}$
- $L_v = 400 \mu\text{m}$

Dans ces conditions trois paramètres restent à optimiser :

- $Q^*_{\pi 1}$ la dose active de la poche extérieure π_1

- $Q^*_{\pi 2}$ la dose active de la poche intérieure $\pi 2$
- le ratio entre les cotes $L_{\pi 1}$ et $L_{\pi 2}$.

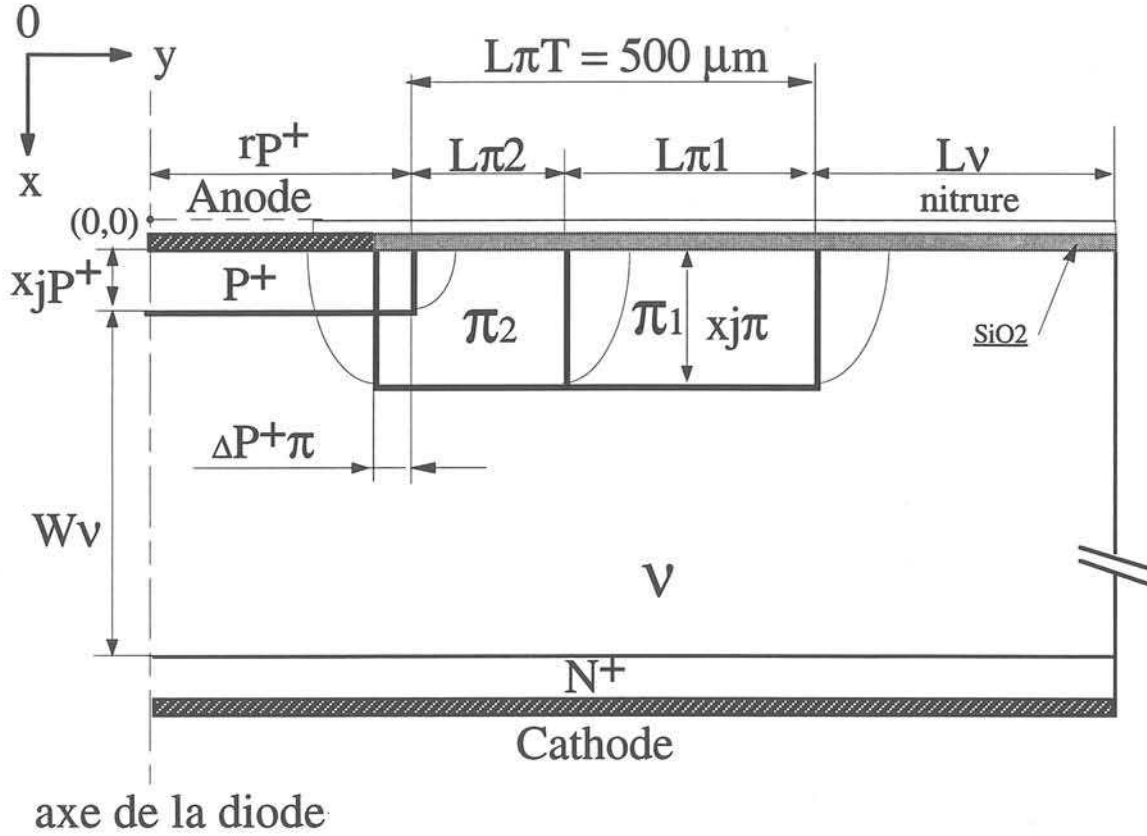


Figure 4.4 : Dimensions principales d'une périphérie bipoche

IV.1.2 Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des doses actives des poches extérieure ($Q^*_{\pi 1}$) et intérieure ($Q^*_{\pi 2}$)

IV.1.2.1 Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active de la poche intérieure

Dans un premier temps, pour étudier la sensibilité de la tenue en tension de périphérie bipoche vis-à-vis de la dose active de la poche intérieure ($\pi 2$), nous avons choisi d'utiliser pour paramètre de la dose active de la poche extérieure $\pi 1$ ($Q^*_{\pi 1}$) la valeur optimale obtenue dans l'étude monopoeche pour la profondeur de la poche π de 12 μm et donc d'imposer:

- $Q^*_{\pi 1} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} = Q^*_{\pi \text{opt}}$ (substrat 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ type N)
- $L_{\pi 2} = 100 \mu\text{m}$ et $L_{\pi 1} = 400 \mu\text{m}$.

Les résultats de simulation de la tenue en tension de la périphérie bipoche vis-à-vis de $Q^*_{\pi 2}$, la dose active de la poche intérieure $\pi 2$ et le champ électrique maximum au claquage sont présentés figure 4.5.

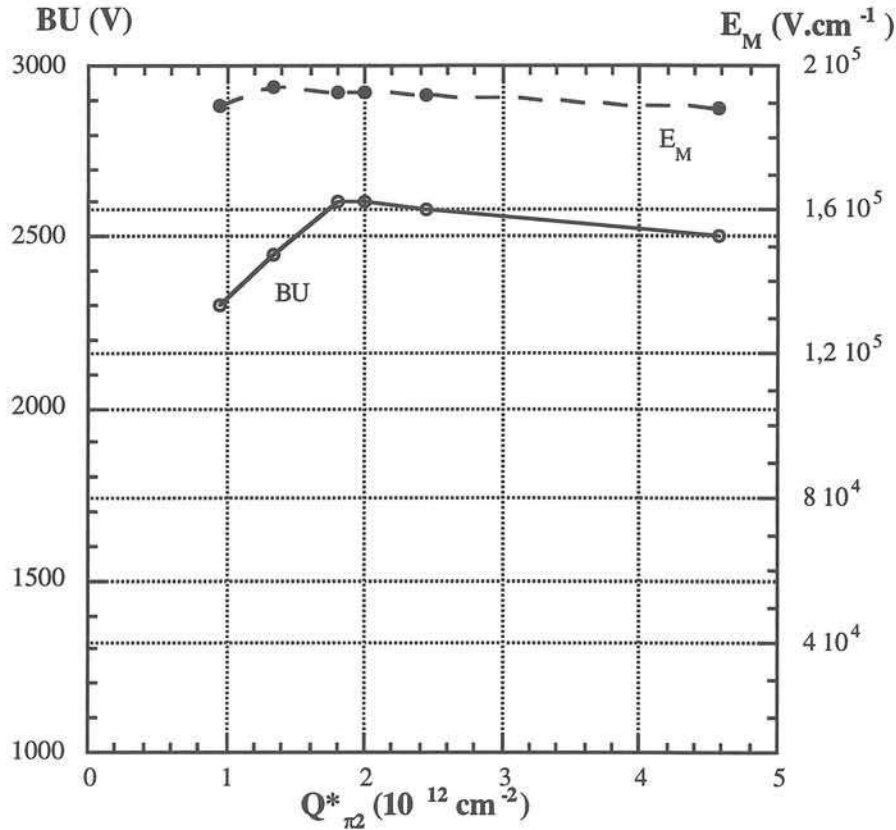


Figure 4.5 : Tenue en tension et champ électrique maximum au claquage en fonction de la dose active de poche intérieure ($Q^*_{\pi 2}$) pour le substrat $100 \Omega.cm$ type N, $Q^*_{\pi 1} = 0,95 \cdot 10^{12} cm^{-2}$, $x_{j\pi 1} = x_{j\pi 2} = 12 \mu m$ (simulation).

Ces résultats montrent comme nous l'avions espéré que la structure bipoche améliore la tenue en tension de la périphérie vis-à-vis de $x_{j\pi}$.

Ainsi, pour $Q^*_{\pi 1} = Q^*_{\pi 2} = 0,95 \cdot 10^{12} cm^{-2} = Q^*_{\pi opt}$ avec la profondeur de poche $x_{j\pi}$ de $12 \mu m$ on avait en monopoche la tenue en tension $BU = 2300V$. Ici, pour le même $x_{j\pi}$ égale à $12 \mu m$ on peut escompter en bipoche, $BU = 2600V$.

Dans les conditions définies précédemment la dose active optimale de la poche intérieure (π_2) devra répondre à :

$$1,8 \cdot 10^{12} cm^{-2} \leq Q^*_{\pi 2 opt} \leq 2,44 \cdot 10^{12} cm^{-2}$$

En variant la dose active $Q^*_{\pi 2}$ de poche intérieure π_2 , le champ électrique maximum au claquage reste presque constant, égal à $1,9 \cdot 10^5 V.cm^{-1}$ soit sensiblement, la valeur du champ maximum au claquage en volume pour la jonction abrupte non tronquée du substrat $100 \Omega.cm$ type N.

IV.1.2.2 Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active de la poche extérieure

Pour étudier la sensibilité de la tenue en tension de périphérie bipoche vis-à-vis de la dose active ($Q^*_{\pi 1}$) de la poche extérieure π_1 on simplifie en maintenant constante la dose active ($Q^*_{\pi 2}$) de la poche π_2 à $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, valeur médiane de l'étude précédente. On fait alors varier la dose active $Q^*_{\pi 1}$.

Pour compléter l'étude de la sensibilité vis-à-vis de la dose active de la poche extérieure $Q^*_{\pi 1}$ on procède de la même manière avec une autre valeur de la dose active de la poche intérieure $Q^*_{\pi 2}$. Cette valeur correspond à la valeur maximale utilisée dans la paragraphe §IV.1.2.1 $Q^*_{\pi 2} = \text{constante} = 4,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Les résultats des simulations obtenus pour ces deux valeurs de $Q^*_{\pi 2}$ et les comparaisons aux résultats de périphérie monopoeche avec la profondeur $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$ sont présentés de manière graphique dans la figure 4.6.

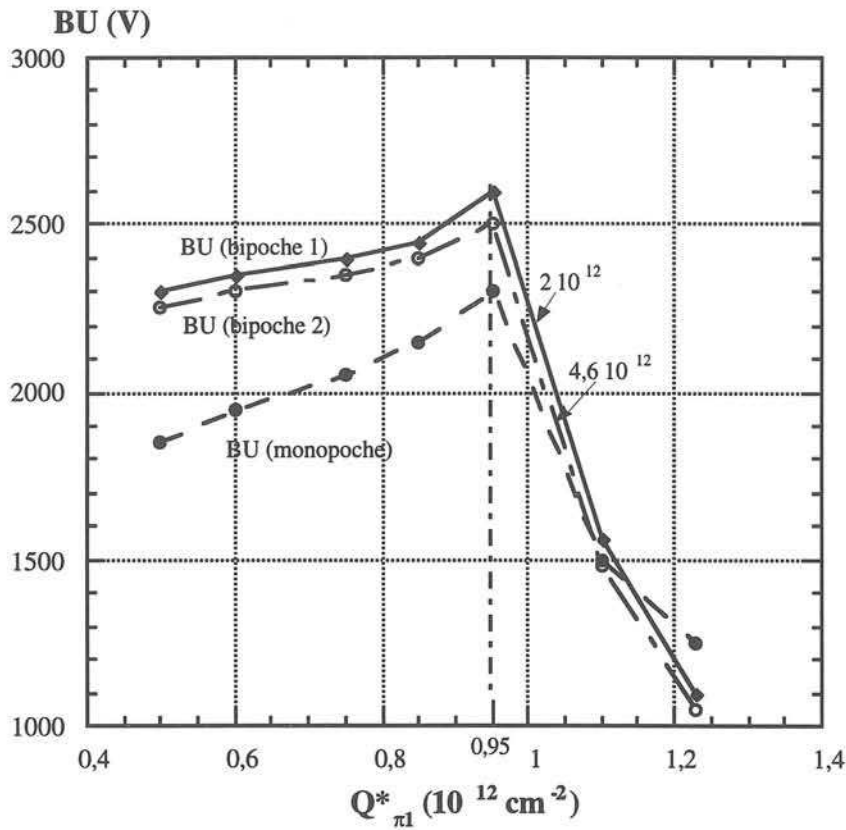


Figure 4.6: Tenue en tension en fonction de la dose active de poche extérieure $Q^*_{\pi 1}$ pour le substrat $100 \Omega \cdot \text{cm}$ type N, $Q^*_{\pi 2} = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (structure bipoche 1) et $Q^*_{\pi 2} = 4,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (structure bipoche 2), $x_{j\pi 1} = x_{j\pi 2} = 12 \mu\text{m}$. Comparaison avec monopoeche $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$ (simulation).

Des ces résultats (figure 4.6) nous constatons que la tendance générale de variation de la tenue en tension est la même pour des périphéries monopoeche ou bipoche. En effet, les graphiques obtenus ont des allures similaires et peuvent comme nous l'avons fait remarquer précédemment être partagés en deux parties : la première correspond à des valeurs $Q^*_{\pi 1} < Q^*_{\pi 1opt}$, la seconde à des valeurs $Q^*_{\pi 1} > Q^*_{\pi 1opt}$.

Cependant pour la première partie du graphique correspondant à $Q^*_{\pi 1}$ inférieure à $Q^*_{\pi 1opt} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, la présence de la poche intérieure ($\pi 2$) permet d'améliorer la tenue en tension de 300 à 400 V. Par ailleurs, elle diminue légèrement la sensibilité de la tension vis-à-vis de la dose active dans la première partie du graphique comme nous pouvons le voir dans la figure 4.6. Ainsi, pour $Q^*_{\pi 1}$ inférieure à $0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ la pente de la courbe $BU = f(Q^*_{\pi 1})$ de la structure bipoche est d'environ 10 % inférieure à celle en monopoeche.

Pour la seconde partie du graphique correspondant à $Q^*_{\pi 1}$ supérieure à $Q^*_{\pi 1opt} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, la sensibilité de la tension claquage vis-à-vis de la dose active de la structure bipoche est presque la même que de celle de la structure monopoeche. Le point de claquage suit le même type de déplacement que pour la structure monopoeche. Ainsi, il se situe dans la zone extérieure à l'interface $\pi 1/v$.

En plus, dans cette partie la dose active $Q^*_{\pi 2}$ de la poche intérieure ($\pi 2$) influence légèrement sur la valeur de la tenue en tension de la structure bipoche. En effet, quand la dose active de la poche intérieure $Q^*_{\pi 2}$ varie de $2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ à $4,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ la valeur de la tension de claquage diminue de 50V à 100V (figure 4.6).

Pour mieux montrer l'influence de la poche intérieure sur la tenue en tension de la structure bipoche, nous avons tracé (figure 4.7) la courbe du champ électrique maximum au claquage en fonction de la dose active de poche extérieure $Q^*_{\pi 1}$ en comparaison avec celle de la structure monopoeche .

Pour la partie correspondant aux valeurs $Q^*_{\pi 1}$ inférieures à $Q^*_{\pi 1opt}$ les tendances de variation du champ maximum au claquage de la structure monopoeche et de la structure bipoche sont différentes. Le champ maximum de la structure bipoche est presque constant et égal à $1,9 \cdot 10^5 \text{ V.cm}^{-1}$ c'est à dire égal au champ maximum au claquage en volume pour la jonction abrupte non tronquée du substrat $100 \Omega.\text{cm}$ type N. Par contre, le champ maximum au claquage pour la structure monopoeche augmente quand la dose active de la poche Q^*_{π} diminue.

Pour la partie correspondant aux valeurs $Q^*_{\pi 1}$ supérieures à $Q^*_{\pi 1opt}$, les tendances de variation du champ maximum au claquage des structures monopoeche et bipoche sont

identiques. En augmentant la dose active de la poche extérieure $Q^*_{\pi 1}$ le champ électrique maximum augmente fortement ceci correspondant corrélativement à la grande chute de la tension de claquage.

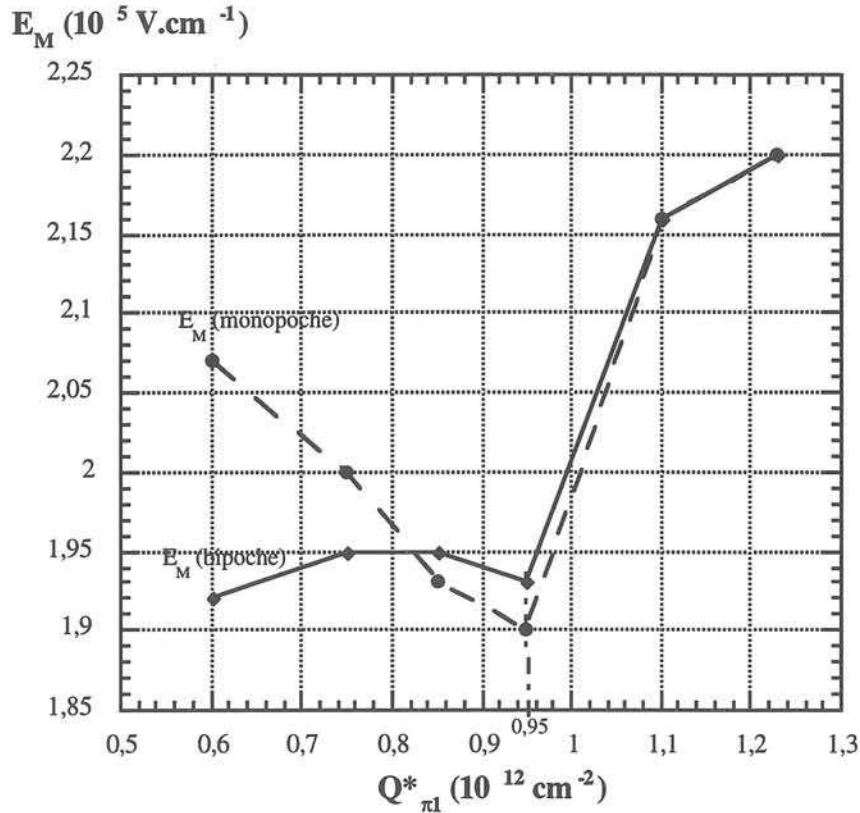


Figure 4.7 : Champ électrique maximum au claquage en fonction de la dose active de poche extérieure ($Q^*_{\pi 1}$) pour le substrat $100 \Omega \cdot \text{cm}$ type N, $Q^*_{\pi 2} = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $x_{j\pi 1} = x_{j\pi 2} = 12 \mu\text{m}$. Comparaison avec la structure monopoeche pour $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$ (simulation).

IV.1.3 Tenue en tension en fonction de la répartition des longueurs des poches intérieure ($L_{\pi 1}$) et extérieure ($L_{\pi 2}$): $BU = f(L_{\pi 1} / L_{\pi 2})$

Une étude complémentaire concerne la répartition des longueurs des poches intérieure ($L_{\pi 2}$) et extérieure ($L_{\pi 1}$). Pour pouvoir assurer une comparaison cohérente, nous avons conservé la largeur totale de cette périphérie constante et égale à la celle utilisée dans la périphérie monopoeche, soit $L_{\pi 1} + L_{\pi 2} = 500 \mu\text{m}$. Seul le rapport entre ces deux grandeurs varie. Les doses actives de ces deux poches sont maintenues constantes et égales à leurs valeurs optimales définies précédemment, à savoir:

- $Q^*_{\pi 1} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$
- $Q^*_{\pi 2} = 2,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

Les résultats de simulation de la sensibilité de la périphérie bipoche vis-à-vis de la longueur $L_{\pi 2}$ en conservant la longueur totale de deux poches $L_{\pi 1} + L_{\pi 2} = \text{const} = 500 \mu\text{m} = L_{\pi T}$ sont présentés figure 4.8.

A partir de ces résultats, nous voyons qu'en augmentant la longueur de poche intérieure ($L_{\pi 2}$) de $50 \mu\text{m}$ à $300 \mu\text{m}$ il existe une valeur optimale ($L_{\pi 2 \text{opt}}$) égale à $100 \mu\text{m}$ qui est correspond à la valeur maximum de la tenue en tension. Alors, il confirme que la répartition optimale entre $L_{\pi 1}$ et $L_{\pi 2}$ est celle prise dans l'étude de la paragraphe §IV.1.3. Il reste cependant à mieux identifier les lois de dépendance de tous ces paramètres pour vérifier que l'optimal est bien le suivant:

- $Q^*_{\pi 2} = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ $L_{\pi 2} = 100 \mu\text{m}$
 - $Q^*_{\pi 1} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ $L_{\pi 1} = 400 \mu\text{m}$
- soit **BU_{max} = 2600 V** escomptés

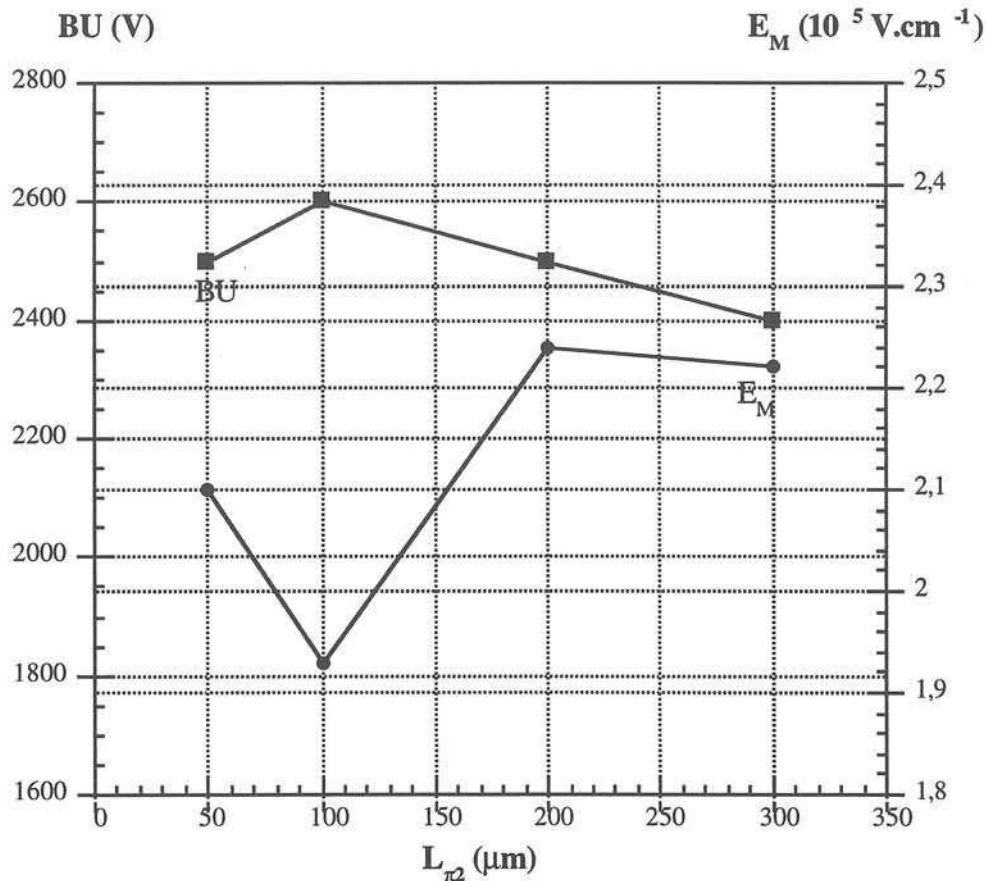


Figure 4.8 : Tenue en tension et champ électrique maximum au claquage en fonction de la longueur $L_{\pi 2}$ de poche intérieure $\pi 2$ en conservant la largeur totale de deux poches $L_{\pi 1} + L_{\pi 2} = \text{const.} = 500 \mu\text{m} = L_{\pi T}$, $Q^*_{\pi 2} = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $Q^*_{\pi 1} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $x_{j\pi 1} = x_{j\pi 2} = 12 \mu\text{m}$ pour le substrat $100 \Omega.\text{cm}$ type N (simulation).

Vis-à-vis du substrat (N 100 Ω .cm + P⁺ graduel) dont la tenue en tension en volume est de 2700 V, la perte devient minime (100 V). La cohérence entre cette périphérie et le matériau utilisé est donc très convenable et ce malgré $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$ seulement.

En monopoche, sur le même silicium, pour tenir 2650V nous avons vu (figure 2.6 dans la paragraphe §II.2.2) qu'il fallait $x_{j\pi} \# 18 \mu\text{m}$ et $Q^*_{\pi\text{opt}} \# 1,2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Si la dose optimale ($Q^*_{\pi\text{opt}}$) ne pose aucun problème, il n'en va pas de même pour $x_{j\pi}$. Le temps de diffusion doit être $(18/12)^2 \geq 2$ fois plus grand en structure monopoche qu'en structure bipoche.

IV.2 REALISATION DES DPHT BIPOCHE

IV.2.1 Masques et principales étapes technologiques des DPHT C3 (bipoche)

Les résultats des simulations induisent tout naturellement une démarche technologique; ce sera le lot **DPHT C3** dans lequel on vérifie que cette double poche améliore la tenue en tension et atténue la sensibilité vis-à-vis de la dose implantée.

Les diodes du lot DPHT C3, correspondent au synoptique présenté figure 4.9 et au diagramme de cheminement annexe IV.1. Ainsi les écarts de la profondeur $x_{j\pi}$ entre ces deux poches ne proviennent que des différences de doses d'implantation.

Pour les DPHT bipoche nous avons conservé toutes les étapes de la réalisation des DPHT monopoche en ajoutant quelques unes pour obtenir deux poches. Les DPHT bipoche comme les monopoche ont une forme circulaire pour diminuer les phénomènes de claquage des parties sphériques. Elles sont aussi réalisées sur des tranches de silicium de diamètres 75 mm. Le jeu de masques est compatible bipoche monopoche. Il se compose par contre de six niveaux au lieu de cinq permettant de réaliser 100 diodes dont 48 diodes de type bipoche et 42 de type monopoche en même temps sur chaque tranche (voir annexe IV.2) 10 sans poches complétant le décompte. Pour chaque type de poche et une partie des motifs une "micro" électrode de champ de longueur 50 μm , présente à la surface permet d'étudier l'effet de ce type de protection sur la tenue en tension.

Ces tranches subissent le même cycle d'oxydation de champ que celui des tranches des lots DPHT C1 et DPHT C2 (5h 30 mn d'oxydation humide suivie de 1h d'oxydation sèche à 1050°C). L'épaisseur de l'oxyde de champ obtenue est de 1,4 μm (mesurée par l'ellipsométrie).

SYNOPTIQUE DE LA DPHT C3

But: *Etude de la bipoche*

CONFIDENTIEL

Figure 4.9 : *Synoptique de la DPHT C3*

Les poches extérieure π_1 et intérieure π_2 sont réalisées par deux implantations successives. La première est pour la dose totale de la poche extérieure (π_1) et une partie de la dose de la poche intérieure (π_2) avec le même masque OPCH 3101 que pour la structure monopoché (voir la figure 3.13 dans §III.3.1) pour l'ouverture de toute la longueur des poches.

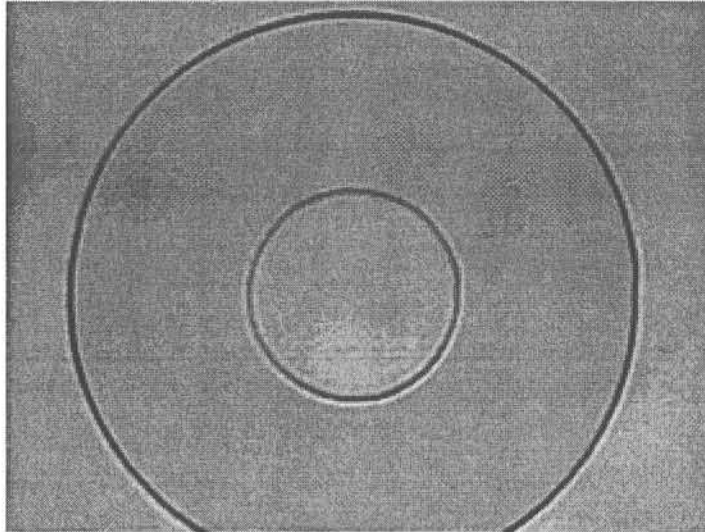


Figure 4.10 : Photographie de l'ouverture de toute la longueur des poches π_1 et π_2 .

Comme précédemment l'implantation est effectuée en présence de la résine pour éviter que des atomes de bore implantés dans l'oxyde ne pénètrent dans le silicium pendant la diffusion des poches (figure 4.11).

Pour 4 tranches de 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ de résistivité nous avons choisi 2 doses implantées pour la poche extérieure (π_1) : $3,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ - dose implantée optimale pour monopoché à partir des résultats du lot DPHT C2 et $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ - dose voisine mais néanmoins, (et prudemment), inférieure à cette valeur optimale. Pour 4 tranches de 140 $\Omega \cdot \text{cm}$ nous avons choisi les doses implantées de la poche π_1 à partir de résultats des simulations de la figure 2.15 dans §II.2.5 et des résultats du lot DPHT C2 : $3,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et $2,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

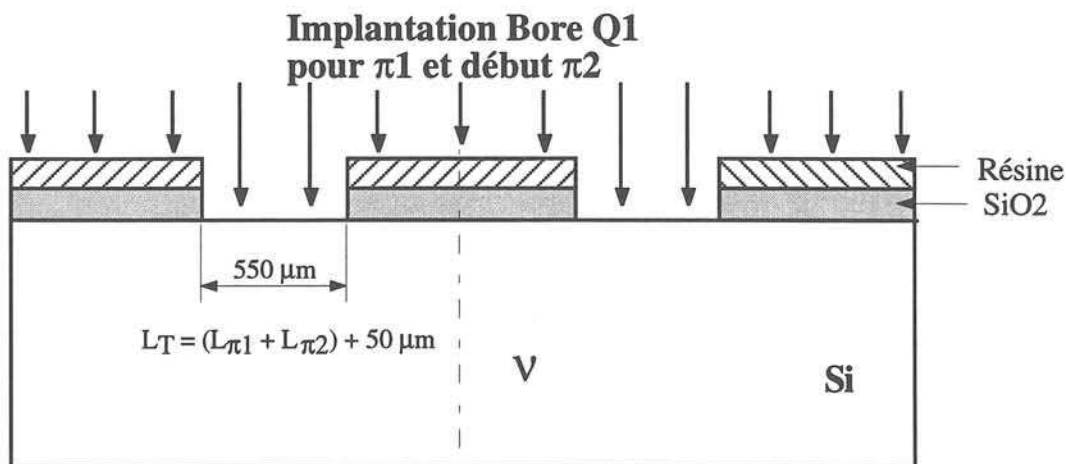


Figure 4.11 : Ouverture et implantation pour la poche extérieure π_1 et une partie de la poche intérieure π_2 .

L'ouverture pour la deuxième implantation pour finir la poche intérieure π_2 est réalisée par le masque OPCH 3401 (figure 4.12) en gardant la résine de la première implantation (voir la figure 4.12). La dose implantée totale (c'est à dire la somme de la première et de la seconde) de la poche intérieure (π_2) pour les tranches de résistivité 100 $\Omega\cdot\text{cm}$ est de $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ dans les 2 cas de π_1 et pour les tranches de résistivité 140 $\Omega\cdot\text{cm}$ est de $4,5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ dans les 2 cas de π_1 .

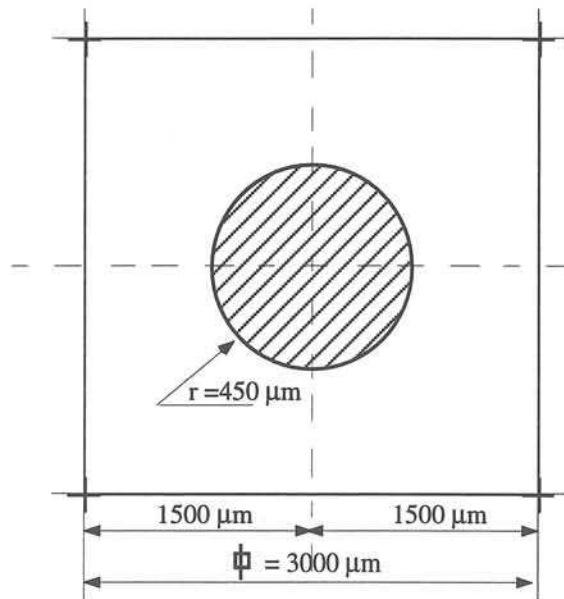


Figure 4.12 : Masque n° 3104 d'ouverture de la poche intérieure π_2

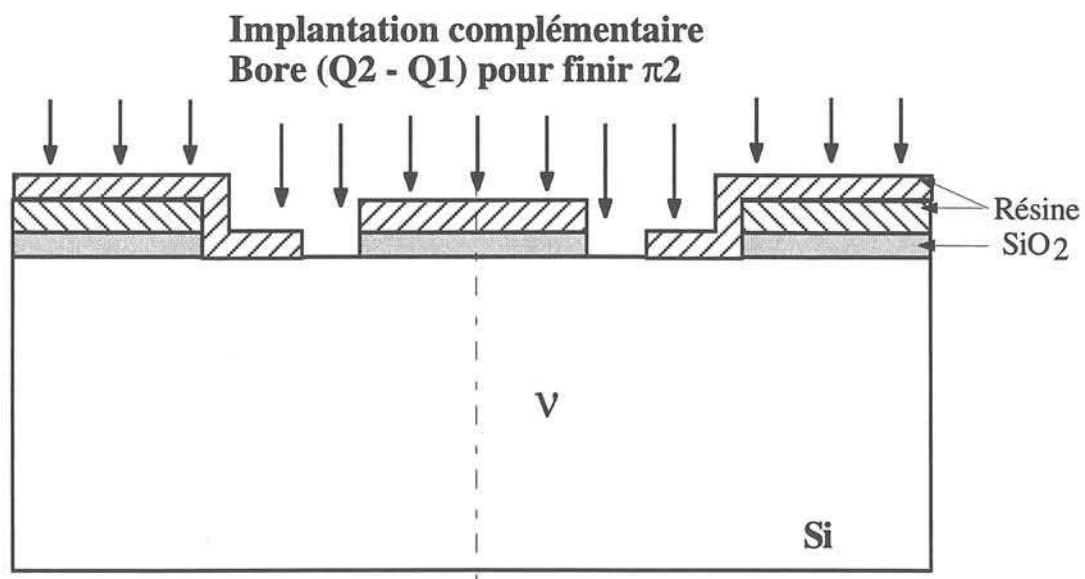


Figure 4.13 : Ouverture et implantation complémentaire pour finir la poche π_2 .

La photographie de l'ouverture de la poche intérieure π_2 est présentée dans la figure 4.14

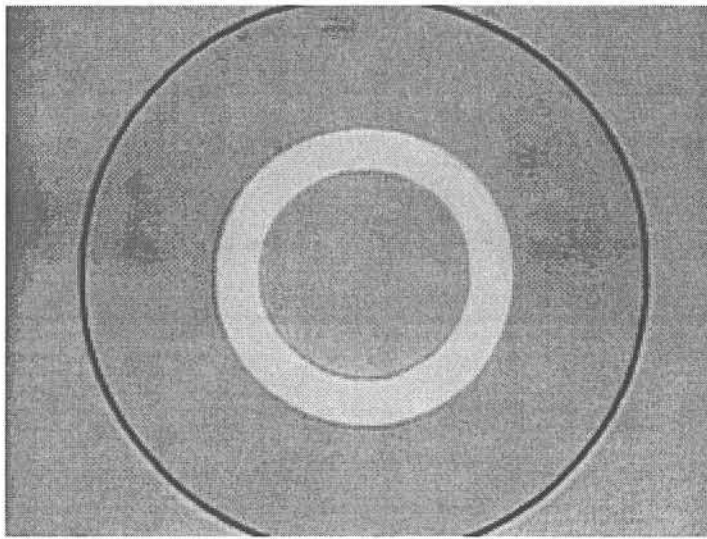


Figure 4.14 : Photographie de l'ouverture pour la poche intérieure π_2

Le masque OPCH 3401 permet d'obtenir simultanément les motifs de monopoches et bipoches sur la même tranche et de bien estimer l'effet de monopoches et bipoches sur les résultats de la tenue en tension.

L'énergie de deux implantations pour toutes les tranches est gardée constante et égale à 160 keV. La diffusion des atomes de bore est réalisée pendant une durée de 100 h sous oxygène à haute température de 1160° C. Les deux poches obtenues avec les différentes profondeurs sont présentées figure 4.15. La couche d'oxyde croissant au-dessus des poches est de 1,7 μm et celle au-dessus du substrat est de 2,2 μm .

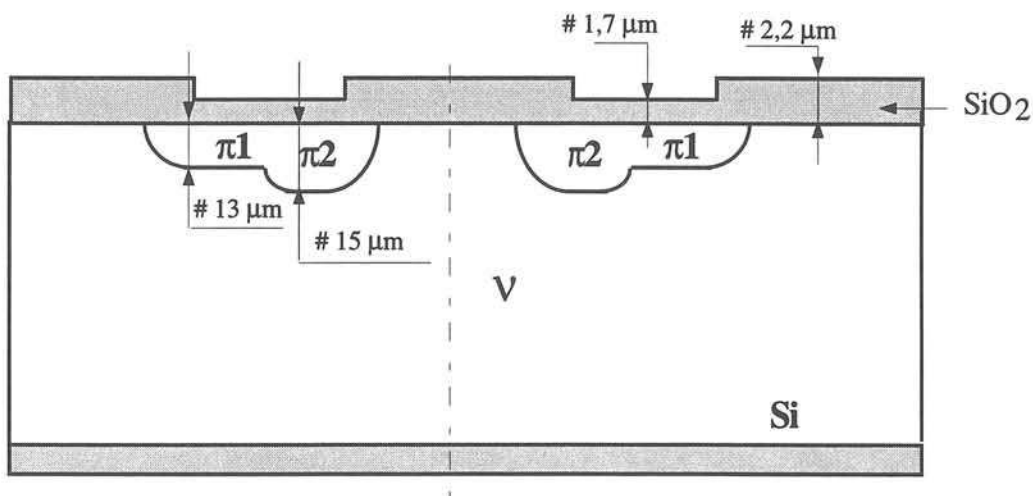


Figure 4.15 : Structure de géométrie de bipoches après 100 h de diffusion à 1160° C sous oxygène.

En utilisant les motifs test comme témoins de chaque étape on détermine le rendement en bore de l'étape de diffusion des poches à 1160°C sous O₂ pendant 100h.

Les résultats de la caractérisation du lot DPHT C3 sont présentés dans le tableau de la figure 4.16. Ces résultats mettent en évidence qu'il n'est pas compliqué de réaliser technologiquement une structure bipoche .

• Lot DPHT C3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX	4 tranches Si FZ ($\rho_V = 100 \Omega.cm$ $W_V \# 280 \mu m$)		4 tranches Si FZ ($\rho_V = 140 \Omega.cm$ $W_V \# 350 \mu m$)	
Tranches n°	17 - 18	19 - 20	26 - 27	28 - 29
Dose implantée dans la poche extérieure π_1 (cm ⁻²)	3 10 ¹²	3,5 10 ¹²	2,5 10 ¹²	3 10 ¹²
Dose implantée dans la poche intérieure π_2 (cm ⁻²)	5 10 ¹²	5 10 ¹²	4,5 10 ¹²	4,5 10 ¹²
Énergie d'implantation (keV)	CONFIDENTIEL			
Diffusion des poches	CONFIDENTIEL			
Profondeur de la jonction $x_j \pi_1$ (μm)	13,6	14,1	12,5	13,1
Dose active dans la poche π_1 : $Q \cdot \pi_1$ (cm ⁻²)	1,37 10 ¹²	1,47 10 ¹²	1,17 10 ¹²	1,23 10 ¹²
Profondeur de la jonction $x_j \pi_2$ (μm)	15,2	15,1	14,5	14,3
Dose active dans la poche π_2 : $Q \cdot \pi_2$ (cm ⁻²)	2,34 10 ¹²	2,0 10 ¹²	2,06 10 ¹²	1,76 10 ¹²
Rendement en bore actif de la poche π_1 (%)	45	42	46,8	41
Rendement en bore actif de la poche π_2 (%)	46,8	40	46	39,1

Figure 4.16 : Caractéristiques technologiques des diodes du lot DPHT C3.

Les étapes technologiques pour réaliser la jonction principale P⁺, la couche N⁺ pour le contact ohmique face arrière ainsi que l'ouverture et la métallisation pour les contacts Anode et Cathode sont identiques à celles utilisées pour réaliser les diodes du lot DPHT C2.

La coupe schématique de DPHT bipoche après gravure aluminium pour l'anode et cathode est présentée figure 4.17.

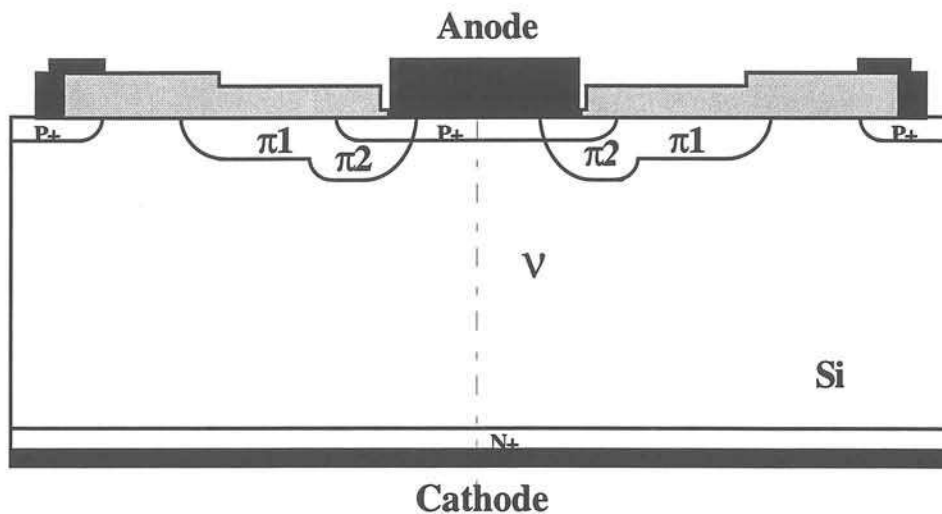


Figure 4.17 : Coupe schématique de DPHT bipoche après gravure aluminium pour l'anode.

Pour éviter l'arcage provoquée en surface à très haute tension, nous utilisons le nitrure de silicium hydrogéné comme une couche de passivation en surface. Le dépôt de NHSi se fait par l'pulvérisation réactive avec ouverture (soudure contact) par le masque n°3106 (figure 4.18). La couche de nitrure est attaquée par gravure sèche RIE (Réaction Ionique Erodante).

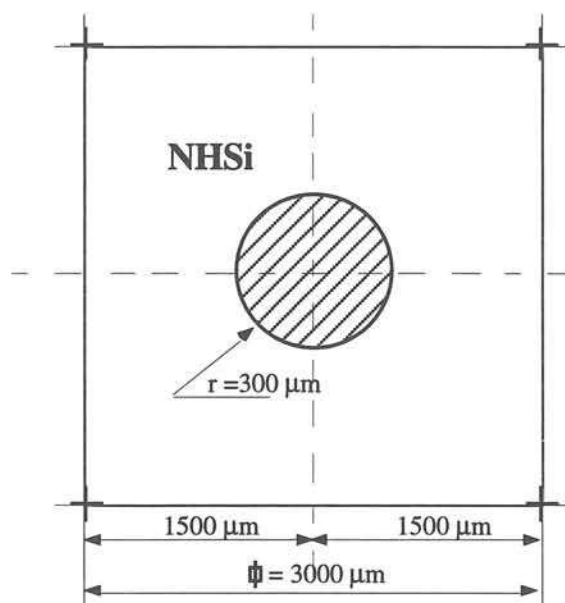


Figure 4.18 : Masque n° 3106 d'ouverture soudure contact.

IV.2.2 Tension de claquage des DPHT bipoche

Les résultats expérimentaux de la tension de claquage pour les diodes du lot DPHT C3 sont présentés dans le tableau de la figure 4.19.

• Lot DPHT C3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX		4 tranches Si FZ ($\rho_V = 100 \Omega.cm$; $W_V \# 280 \mu m$) BU idéale plane # 2700 V		4 tranches Si FZ ($\rho_V = 140 \Omega.cm$; $W_V \# 350 \mu m$) BU idéale plane # 3400 V	
N° des tranches		17 - 18	19 - 20	26 - 27	28 - 29
Dose implantée dans la poche extérieure π_1 (cm^{-2})		$3 \cdot 10^{12}$	$3,5 \cdot 10^{12}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{12}$
Dose implantée dans la poche intérieure π_2 (cm^{-2})		$5 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{12}$	$4,5 \cdot 10^{12}$	$4,5 \cdot 10^{12}$
Energie d'implantation (keV)		CONFIDENTIEL			
Diffusion des poches		CONFIDENTIEL			
Tension de claquage maximum (V) (testée à 0,5 mA après métallisation)	monopoche	2370	2690	2480	3000
	bipoche	2540	2700	3005	3100
Tension de claquage médiane (V) (testée à 0,5 mA après métallisation)	monopoche	2250	2350	2250	2550
	bipoche	2400	2600	2750	2750
Tension de claquage maximum (V) (testée à 0,5 mA après dépôt niture)	monopoche	non fait	non fait	2780	problème de surface à résoudre
	bipoche	non fait	non fait	3350	

Figure 4.19 : Récapitulatif des tensions de claquage du lot DPHT C3

A partir des résultats expérimentaux du lot DPHT C3, nous voyons qu'il existe une amélioration de la tenue en tension de la périphérie bipoche par rapport à celle de monopoche (de 200 V à 500V selon la dose de la poche extérieure (π_1) et le dopage du substrat). Il est

remarqué que plus l'écart entre la dose implantée de la poche intérieure (π_2) et celle de la poche extérieure est grand, plus le gain en tenue en tension entre la structure monopoeche et la structure bipoeche est important. D'ailleurs, nous avons noté que la tenue en tension de la structure bipoeche atteint presque la valeur de la tension de claquage en volume pour le substrat utilisé (# 2700 V pour le substrat 100 Ω .cm, N et # 3350 V pour le substrat 140 Ω .cm, N). En testant les motifs avec électrode de champ nous remarquons que cette électrode stabilise le courant de fuite mais ne joue aucun rôle pour la tenue en tension.

En testant sous pointe des tensions de claquage pour les diodes du substrat 140 Ω .cm type N nous avons rencontré le problème de l'arcage en surface pour une tension inverse appliquée de l'ordre de 3000 V. Nous avons déposé une couche de nitrure de silicium hydrogéné pour éviter ce phénomène mais les résultats ne sont pas toujours reproductibles pour les motifs sans électrode de champ et surtout les courants de fuite ne sont pas stables. Nous avons envisagé d'essayer d'autres matériaux de passivation en surface comme les verres dopé au phosphore (phosphosilicate issu du dépôt P_2O_5) ou de bore (borosilicate par B_2O_3) ou par immersion dans un diélectrique liquide comme le GALDEN. Quelques résultats obtenus sont proposés au chapitre V.

CONCLUSION DU CHAPITRE IV

Dans ce chapitre nous avons présenté la conception et la réalisation de la périphérie planar bipoeche. Dans la première partie, en complément aux résultats obtenus par simulations pour la structure monopoeche optimale, nous avons ajouté une implantation supplémentaire autour de la jonction principale. L'objectif était de diminuer le gradient de dopage dans cette région à faible rayon de courbure donc d'augmenter la tenue en tension. Pour justifier l'effet de cette poche non homogène, nous avons effectué des simulations bidimensionnelles à l'aide du logiciel ATLAS/PISCES. La sensibilité de la tenue en tension de la structure bipoeche vis-à-vis de la dose active des poches intérieure et extérieure a été étudiée. Nous avons également optimisé la répartition des longueurs de ces poches.

Dans la deuxième partie, pour valider ces calculs nous avons réalisé les diodes avec des terminaisons bipoeche par une double implantation ionique de bore suivie d'une diffusion simultanée. La description du processus technologique pour réaliser la structure bipoeche a été exposée dans cette partie où chaque étape était illustrée par les différents niveaux de masques et la coupe du dispositif.

Les résultats expérimentaux des caractérisations de la périphérie bipoeche confirment une amélioration de la tenue en tension par rapport à celle de la structure monopoeche pour les mêmes cycles de diffusion. La périphérie bipoeche optimale a permis d'atteindre ou d'approcher d'extrêmement près la valeur de la tenue en tension en volume du substrat donné.

CHAPITRE V

Chapitre V

COURANT DE FUITE DES DIODES A POCHE HAUTE TENSION

INTRODUCTION

Les courants de fuite jouent un rôle particulièrement important sur les caractéristiques statiques et dynamiques des composants à semiconducteurs. Ces courants sont essentiellement attribués aux défauts "volumiques" dans le substrat semiconducteur et aux défauts "surfacciques". Des progrès importants ont concernés la réduction de la densité des défauts volumiques et, par conséquent, des composantes du courant de fuite associées au courant de génération dans les zones des charges d'espace et au courant de diffusion des porteurs minoritaires dans les régions neutres, caractérisées respectivement par la durée de vie de génération τ_g et par la longueur de diffusion des porteurs minoritaires. Pour fabriquer des composants de haute tension on utilise du silicium de haute résistivité donc favorable à la durée de vie. Sa valeur plus élevée compense ainsi, au moins en partie, l'effet de grande zone de charge d'espace dû à la haute tension.

Par contre, la densité des états à l'interface SiO_2/Si , bien que très diminuée (jusqu'à quelques 10^9 cm^{-2} pour les meilleures), n'a pas été cependant réduite dans les mêmes proportions que celles de la densité des défauts volumiques dans le substrat de silicium. La composante du courant de fuite générée en surface est généralement prépondérante, tout au moins au voisinage de la température ambiante, vis-à-vis du courant de génération volumique et du courant de diffusion. Elle est dépendante de la terminaison utilisée, de la couche passivante et des qualités de l'oxyde utilisé pour recouvrir localement la surface du composant.

D'où l'importance de déterminer cette composante en surface et sa variation au cours des nombreuses étapes de fabrication des composants, en particulier des diverses oxydation, implantations ioniques, gravures par plasma. Ces opérations contribuent à augmenter, le plus fréquemment (parfois à réduire), la densité des centres de génération en surface de façon le plus souvent inhomogène de sorte que la vitesse de génération interfaciale n'est généralement pas constante tout au long de la surface.

Par ailleurs, il est connu que l'effet de restauration du phosphore sur les défauts volumiques peut s'exercer sur des distances très grandes [68]. Il est donc intéressant de vérifier cet effet de phosphore implanté sur le courant de fuite des diodes de haute tension en poche.

Ce chapitre a pour but de caractériser le courant de fuite des DPHT et étudier l'influence des charges dans l'oxyde sur leurs paramètres caractéristiques en inverse.

Dans la première partie de ce chapitre, après une étude physique du courant de fuite, des charges dans l'oxyde et de celles à l'interface SiO₂/Si, nous présentons les résultats des simulations électriques issus du module PISCES du logiciel ATLAS. Elles montrent l'influence de charges dans l'oxyde sur le courant de fuite des DPHT. Ensuite, nous présentons les résultats des mesures du courant de fuite des DPHT en fonction de la température pour définir son origine.

Nous exposons enfin les effets des implantations de phosphore et bore dans l'oxyde ainsi que ceux d'une implantation de phosphore sur la face arrière de la tranche de silicium sur le courant de fuite. Les comparaisons entre les différents motifs permettent d'analyser l'influence des paramètres de conception sur la caractéristiques électriques de périphérie en poche.

Dans cette perspective, la deuxième partie de ce chapitre sera consacrée aux résultats des simulations électriques issus du module PISCES du logiciel ATLAS pour évaluer l'influence de charges dans l'oxyde sur la tenue en tension.

V.1 COURANT DE FUITE DES DPHT

V.1.1 Courants de fuite d'une jonction PN

Le courant de fuite d'une jonction PN polarisée en inverse a trois origines [3]:

- courant de diffusion des minoritaires dans les zones neutres du silicium.
- courant de génération thermique. Il est dû à la création de paires électrons trous dans la zone des charges d'espace (ZCE).
- courant de génération en surface. Il est lié à l'état de surface du silicium dans la région d'émergence de la jonction.

• courant de "diffusion des minoritaires"

Lorsqu'un électron minoritaire de la région P parvient en limite de ZCE, le champ électrique le propulse dans la région N où il est porteur majoritaire. Il atteint alors le contact N. Le même raisonnement s'applique aux trous minoritaires de la région N.

La densité de courant de diffusion des trous et des électrons des régions neutres vers la ZCE s'écrit (si on néglige la génération de porteurs dans la ZCE):

$$J_{\text{dif}} = -qn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_{pn}N_D} + \frac{D_n}{L_{np}N_A} \right) \quad (5.1)$$

où: L_{pn} , D_p : longueur et constante de diffusion des trous dans la région N

L_{np} , D_n : longueur et constante de diffusion des électrons dans la région P

N_A , N_D : dopages respectifs côté P et N

n_i : concentration intrinsèque.

$$n_i = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (5.2)$$

Pour le silicium: $A=6,9 \cdot 10^{15}$ et $E_g=1,12$ eV

et pour 300 K: $n_i=1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

• *courant de "génération thermique" dans la zone de charge d'espace*

A température ambiante, cette composante est beaucoup plus importante que la première.

Des paires électrons trous sont générées thermiquement dans la ZCE par l'intermédiaire d'impuretés ou de défauts présents dans le volume du semiconducteur. La densité de courant de génération s'écrit:

$$J_{\text{gén}} = -qW \frac{n_i}{2\tau} \quad \text{avec } W = \sqrt{\frac{2\epsilon_{\text{Si}}\epsilon_0}{qN_D}|U|} \quad (5.3)$$

où: W : largeur de la zone des charges d'espace

τ : durée de vie de génération

Les deux composantes de volume J_{diff} et $J_{\text{gén}}$ sont intrinsèques au silicium et générées dans le volume du composant. J_{diff} est proportionnel à n_i^2 et $J_{\text{gén}}$ est proportionnel à n_i , l'évolution avec la température de ces deux composantes n'est pas la même.

A ce moment - là, l'étude en température du courant de fuite permet de déterminer l'origine du courant mesuré, origine qui peut être due au courant de diffusion ou au courant de génération. Une évolution du courant de fuite avec n_i indique que la cause de la fuite est les centres profonds présents. Une variation avec n_i^2 montre que la fuite est due aux courants des minoritaires. Usuellement, pour le silicium la composante de génération domine le courant de fuite. Cependant plus la température augmente plus la probabilité de voir cette tendance se renverser augmente (c'est - à - dire voir le courant de diffusion prédominer).

• *courant de génération en surface*

Dans une diode réelle le courant de fuite dépend non seulement des défauts volumiques mais aussi des états d'interface SiO_2/Si et plus généralement les nombreuses causes déterminant au total le courant surfacique de fuite [69].

En générale le courant de génération en surface peut être décomposé en deux composantes :

- un courant de fuite lié à la génération latérale en surface autour du périmètre de la jonction.
- un courant surfacique lié à l'effet "tunnel Zener" dans le cas où l'interface est en régime de forte accumulation à cause de nombreuses charges fixes à l'interface SiO_2/Si .

La figure 5.1 donne une représentation schématique des différentes possibilités des charges dans l'oxyde à l'interface SiO_2/Si . Selon le signe des charges Q_{ss}^* l'interface peut être en régime d'accumulation figure 5.1b,c (Q_{ss}^* est positive), de déplétion figure 5.1d et d'inversion figure 5.1e (Q_{ss}^* est négative).

Le courant de fuite en surface peut être augmenté par la présence de charges électriques dans

les oxydes passivants et les états d'interface. Les charges fixées modifient le potentiel en surface autour du périmètre des diodes. Les états d'interface agissent comme des centres de génération-recombinaison. Sous condition si l'on peut dire favorable (voir figure 5.1 de (b) à (d)) ils peuvent créer le courant en surface dans les régions où la zone de charge d'espace atteint la surface.

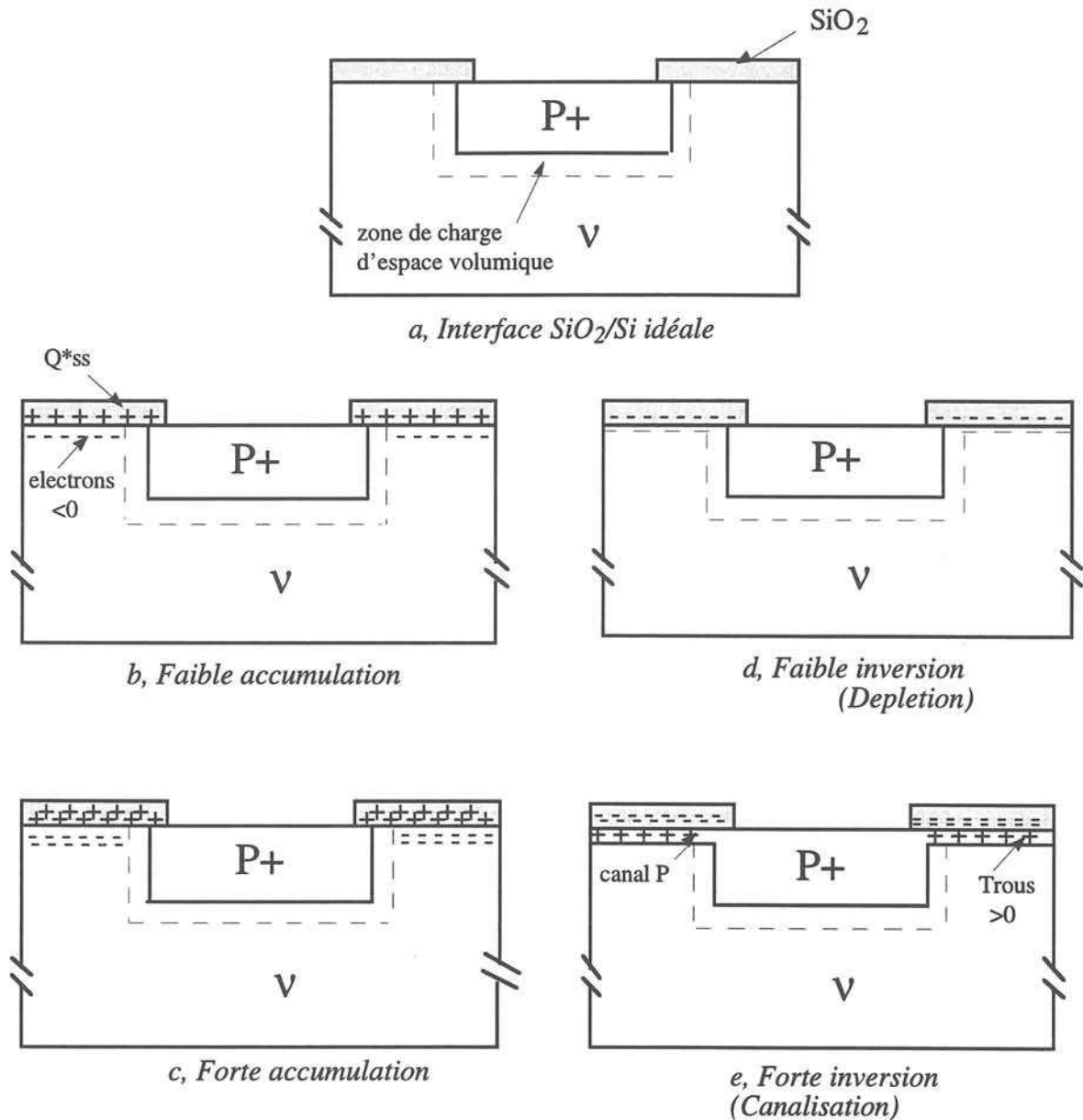


Figure 5.1 : Représentation schématique de différentes possibilités d'interaction des charges d'interface SiO_2/Si avec une jonction $\text{P}^+ \text{v}$ dans la zone de remontée à la surface: a, interface SiO_2/Si idéale.

b, charges d'interface Q^*_{ss} positives relativement faibles.

c, charge d'interfaces Q^*_{ss} positives relativement importantes

d, charges d'interface Q^*_{ss} négatives relativement faibles.

e, charges d'interface Q^*_{ss} négatives relativement importantes.

Contrairement au courant de diffusion en volume les courants de génération en surface ou en volume sont des composantes “technologiques”, dépendant des techniques utilisées pour fabriquer le composant.

Dans le cas de la technologie planar, l'oxyde est souvent utilisé comme élément de masquage lors des étapes d'implantation. Ce rôle d'écran introduit des charges dans l'oxyde et à l'interface SiO₂/Si ce qui contribue à la création d'un courant de fuite “en surface”.

V.1.2 OXYDE DE SILICIUM EN SURFACE

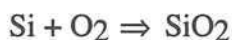
V.1.2.1 Oxydation du Silicium

En technologie planar, les composants semiconducteurs sont fabriqués à partir d'un substrat monocristallin (silicium) sur lequel on réalise différentes couches actives. A chaque étape de dopage de ces couches, l'oxyde de silicium est généralement utilisé comme masque. Pour obtenir une couche d'oxyde on peut travailler de plusieurs manières :

- Oxydation anodique électrolytique (température ambiante)
- Dépôt d'un oxyde sur le substrat (oxydation assistée par plasma : 220° - 800° C)
- Croissance d'un oxyde à partir du substrat (oxydation thermique : 700° - 1250°C)

Pour réaliser des DPHT on met en oeuvre l'oxydation thermique en plaçant les tranches de silicium dans un four à haute température. L'oxyde joue un rôle important pour diminuer la recombinaison en surface. En effet l'interface entre le silicium et cet oxyde est peu recombinante car presque tous les atomes de surface dans le Silicium ont des liaisons saturées par un atome de Silicium voisin ou par un atome d'oxygène. La formation de l'oxyde à haute température permet la formation d'une structure avec peu d'états d'interface [55] donc diminue la composante du courant en surface.

La première solution, appelée oxydation sèche, consiste à effectuer la croissance de l'oxyde sous flux d'oxygène pur. L'oxyde est généré par la réaction suivante :



Une seconde solution dite oxydation humide consiste à faire croître l'oxyde sous un flux d'oxygène chargé en vapeur d'eau. Dans cette configuration la croissance de l'oxyde est généré par la réaction :



L'oxydation humide est nettement plus rapide que l'oxydation sèche, mais produit un oxyde de moins bonne qualité. La réalisation d'oxyde épais est généralement effectuée par la filière oxydation humide pour limiter la durée de l'opération au détriment de la qualité de l'oxyde réalisé.

La couche finale de l'oxyde devant être imperméable vis-à-vis de la diffusion de certaines impuretés. Souvent, on génère en surface une couche d'oxyde de silicium riche en

phosphore appelé verre de phosphore ou riche en bore et phosphore appelé verre de bore et phosphore. Cette couche d'isolante constitue une barrière aux impuretés comme les ions sodium et potassium susceptibles de polluer et d'altérer la fiabilité du dispositif [2].

V.1.2.2 Charges dans l'oxyde

La croissance de l'oxyde de silicium par voie thermique induit certaines charges parasites tant dans son volume qu'à son interface avec le silicium. La quantité de ces charges est un indicateur de la qualité de l'oxyde. Elle dépend non seulement de la phase d'oxydation (durée, température et ambiante), mais aussi de celle du substrat, des étapes antérieures (nettoyage de surface) et postérieure, (contraintes mécaniques dues aux divers traitements thermiques de la tranche et aux couches supérieures). Il semble bien que ces charges de natures différentes soient à l'origine des instabilités dans les dispositifs haute tension (tension de claquage, courant de fuite...) [1]. D'après SZE [2] il en existe quatre types de charges dans l'oxyde et à son interface avec silicium (figure 5.2), à savoir :

- Charges d'interface SiO_2/Si (Q^*_{it})
- Charges fixes dans l'oxyde (Q^*_f)
- Charges piégées dans l'oxyde (Q^*_{ot})
- Charges ioniques mobiles (Q^*_m).

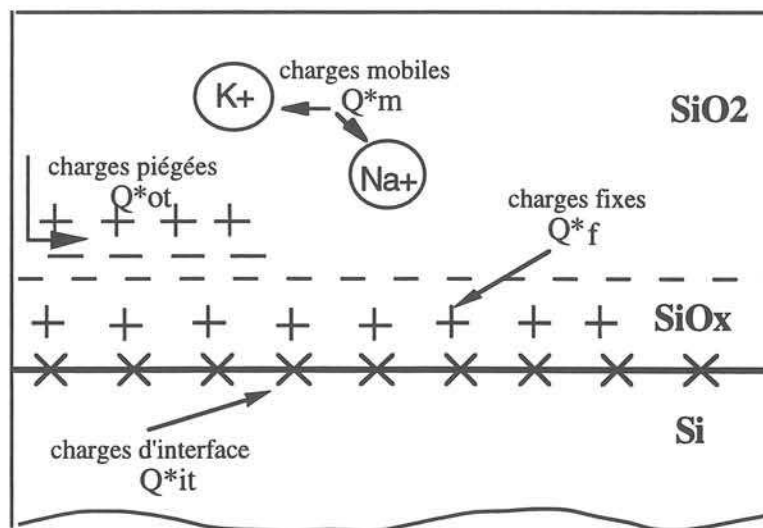


Figure 5.2 : Charges dans l'oxyde de silicium et à l'interface SiO_2/Si d'après SZE [2]

On peut en réalité citer un cinquième type de charges qui existe à l'extérieur, à la surface de la couche d'oxyde non protégée (Q^*_{ext}). Ces charges extérieures sont de signes différents suivant l'ambiance dans laquelle est située le dispositif. Sous ambiance humide ces charges sont souvent de signe négatif. Elles peuvent introduire des charges parasites dans l'oxyde donc modifier la qualité de celui-ci.

•Charges d'interface Q_{it}^ :*

Les charges d'interface se localisent à l'interface SiO_2/Si , à cause de l'interruption du réseau cristallin du silicium. Elles introduisent des niveaux d'énergies supplémentaires dans la bande interdite. La possibilité d'occupation de ces niveaux dépend du potentiel de surface du silicium Φ_s . La densité de charges Q_{it} est de l'ordre de 10^{11} à 10^{12} cm^{-2} .

•Charges fixes Q_f^ :*

La croissance thermique de l'oxyde contribue à la complexité de l'interface SiO_2/Si . Entre le silicium cristallin et le SiO_2 amorphe se trouve une zone SiO_x (avec $x < 2$) d'une épaisseur d'environ 3 nm. Certaines liaisons covalentes Si-O ne sont pas formées, le silicium apparaît en excès sous forme d'ions Si^+ dans la zone de transition SiO_x . Les charges fixes Q_f^* sont souvent positives et ne peuvent pas changer de polarité. Leur densité est de l'ordre de 10^{10} à 10^{12} cm^{-2} . Elles dépendent des conditions de l'oxydation (ambiance, température) et de l'orientation du silicium.

Localisées à l'interface, elles modifient la courbure de bandes à la surface du silicium. La tension de bande plate U_{FB} est alors différente de sa valeur idéale ϕ_{ms} (ϕ_{ms} correspond à la différence des travaux de sortie du métal et du silicium). Le décalage du U_{FB} permet d'évaluer la densité de charges fixes par méthode C(V). La valeur de Q_f^* pour le silicium $\langle 100 \rangle$ est inférieure à celle du silicium $\langle 111 \rangle$.

•Charges piégées dans l'oxyde Q_{ot}^ :*

Lors du procédé de fabrication, des liaisons O-Si-O peuvent être brisées par des électrons ou des ions de haute énergie (attaque plasma, implantation ionique...). Il subsiste dans l'oxyde des ions fixes SiO^+ ou Si^{2+} . Leur densité, variant entre 10^9 à 10^{13} cm^{-2} , peut être évaluée notamment par les techniques C(V).

•Charges mobiles Q_m^ :*

Les charges mobiles sont dues à une contamination de l'oxyde par différents impuretés, principalement les ions alcalins (Na^+ , K^+), introduites lors du processus de réalisation (ils proviennent en partie des tubes en quartz utilisés dans les fours d'oxydation). A température ambiante, la plupart des ions sont piégés aux interfaces ($\text{SiO}_2/\text{métal}$ et Si/SiO_2) dans les lacunes [2]. Cependant, elles sont mobiles à haute température et sous polarisation.

En mesurant le courant déplacé dans l'oxyde sous l'action d'un champ électrique à haute température on peut estimer la quantité de charges mobiles. La densité de charges mobiles est de l'ordre de 10^{10} à 10^{12} cm^{-2} ou plus. Cette valeur dépend du procédé chimique et de son environnement.

V.1.3 Influence des charges fixes positives à l'interface SiO₂/Si sur le courant de fuite des DPHT

Les charges fixes dans l'oxyde à l'interface SiO₂/Si sont connues pour être des charges positives [1] [2]. Leur nombre peut être défini par la relation:

$$N^*_f = Q^*_f / q \quad (5.4)$$

Avec Q^*_f : la charge effective par unité de surface (C.cm⁻²) à l'interface SiO₂/Si.

N^*_f : nombre de charge par unité de surface (cm⁻²),

q : charge élémentaire de l'électron (C).

Pour étudier l'influence des charges fixes à l'interface SiO₂/Si sur le courant de fuite des DPHT, nous avons utilisé les géométries définies pour les structures monopoche et bipoche dans les paragraphes §II.1 et §IV.1. Le calcul du courant de fuite est réalisé avec le même programme du logiciel ATLAS/PISCES que celui de la tension claquage. Pour le faire fonctionner on prend une valeur de la durée de vie de porteur minoritaire égale à 10 μs, comme classiquement rencontrée dans le substrat de haute résistivité [67].

A titre d'exemple on présente une courbe de simulation de caractéristique en inverse (figure 5.3) d'une diode bipoche ($L_{\pi 1} = 400 \mu m$, $L_{\pi 2} = 100 \mu m$, $r_{p+} = 350 \mu m$ soit une section totale $S_{\pi + p+} = 2 \text{ mm}^2$).

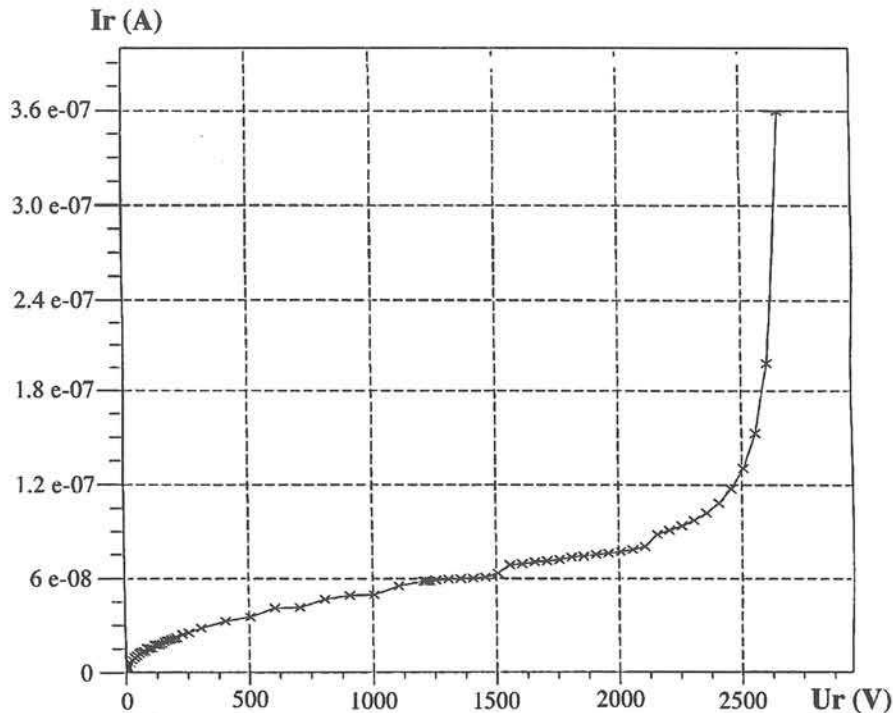


Figure 5.3 : Caractéristique en inverse (simulation) d'une diode bipoche (substrat type N 100 Ω.cm, $r_{p+} = 350 \mu m$, $L_{\pi 1} = 400 \mu m$, $L_{\pi 2} = 100 \mu m$, $x_{j\pi 1} = x_{j\pi 2} = 12 \mu m$, $Q^*_{\pi 1} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $Q^*_{\pi 2} = 2,0 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $N^*_f = 10^{10} \text{ cm}^{-2}$), $\tau = 10 \mu s$.

La figure 5.4 représente les résultats de calcul des courants de fuite en fonction des charges fixes positives à l'interface SiO₂/Si pour la tension inverse de 1000 V pour les diodes de

type monopoeche des 3 projets "3000V", "2200V", "1800V". A savoir :

Motif	$r_{p^+}(\mu m)$	$L_{\pi}(\mu m)$	$S_{p^+}(mm^2)$	$S_{\pi}(mm^2)$
"3000 V"	350	500	0,38	1,9
"2200 V"	900	250	2,5	1,65
"1800 V"	968	117	2,9	0,8

La profondeur et la concentration en surface de la couche P^+ sont identiques pour tous les motifs ($C_{sp^+} = 8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $x_{jp^+} = 4,5 \mu m$). La profondeur et la dose active de la poche π pour tous les motifs sont les mêmes ($x_{j\pi} = 12 \mu m$, $Q^*_{\pi} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$).

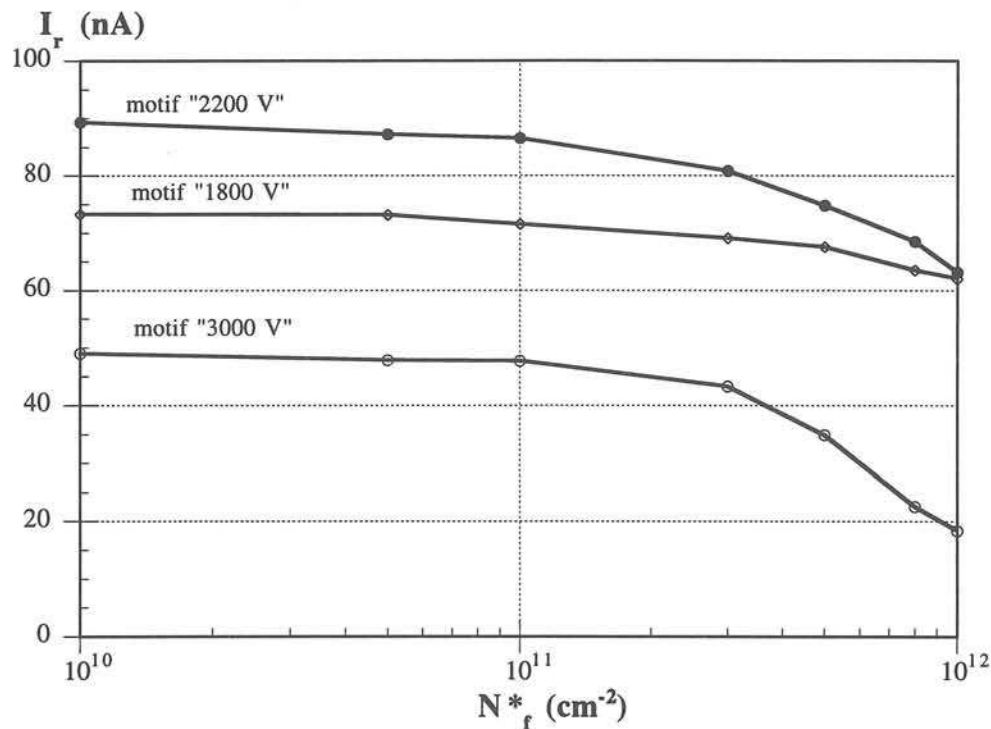


Figure 5.4 : Courants de fuite pour les diodes de type monopoeche des 3 projets: "3000 V", "2200 V", "1800 V" en fonction des charges fixes positives à l'interface SiO_2/Si pour la tension inverse appliquée 1000V (substrat N 100 $\Omega \cdot \text{cm}$, $x_{j\pi} = 12 \mu m$, $Q^*_{\pi} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $\tau = 10 \mu s$ (simulation).

On voit qu'en augmentant le nombre des charges fixes positives dans l'oxyde le courant de fuite a tendance à diminuer et ce d'autant plus que la surface de la poche est importante. Pour tous les motifs, les charges fixes positives ont une nette influence sur le courant de fuite à partir d'une valeur de l'ordre de $3 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

Nous avons ensuite présenté l'influence des charges fixes positives à l'interface SiO_2/Si sur le courant de fuite pour la diode de périphérie bipoeche. Les résultats de simulation sont présentés dans la figure 5.5. La même remarque peut être faite, à savoir que sous l'influence des charges fixes positives à l'interface SiO_2/Si le courant de fuite de diode en périphérie bipoeche a la même tendance que celle de la périphérie monopoeche.

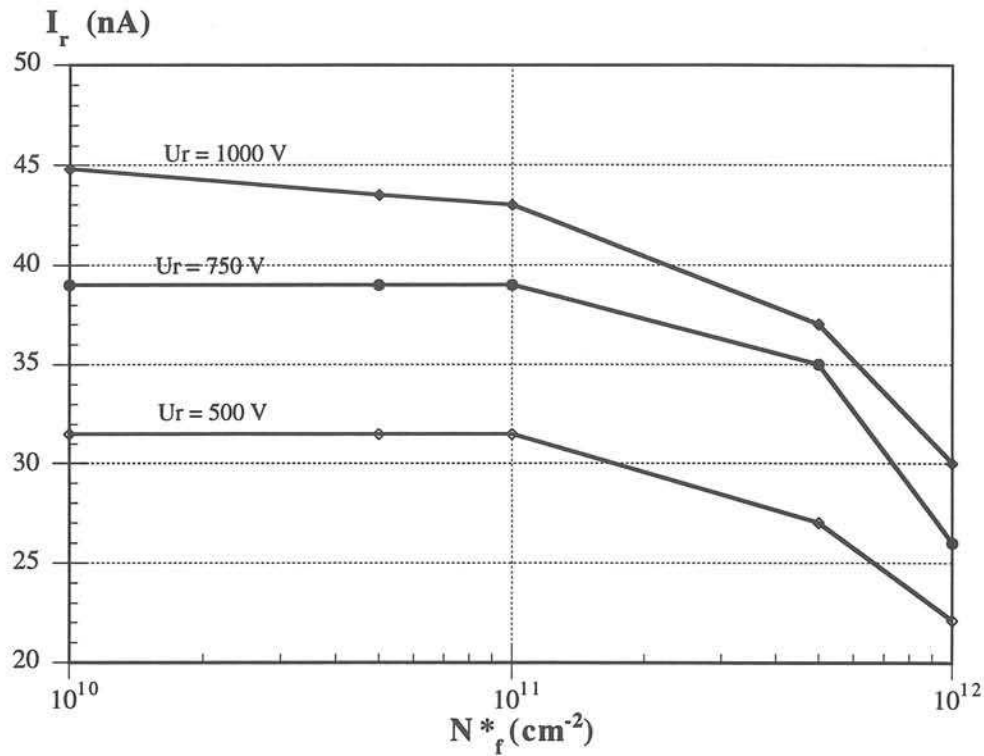


Figure 5.5 : Courants de fuite de diode de type bipoche en fonction des charges fixes positives à l'interface SiO_2/Si pour les 3 valeurs de tension inverse: 500V; 750V; 1000V. (substrat $100 \Omega \cdot \text{cm}$ type $N^+ \pi 2 = x_j \pi 1 = 12 \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi 2} = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $Q^*_{\pi 1} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) $\tau = 10 \mu\text{s}$ (simulation).

En conclusion, les simulations électriques nous ont permis d'étudier l'influence des charges fixes dans l'oxyde sur le courant de fuite. Cependant, pour qualifier l'oxyde, on ne dispose que du paramètre N^*_f , ce qui empêche de simuler l'effet des autres charges existantes dans l'oxyde. Il apparaît donc difficile de trouver des résultats en cohérence avec les mesures effectuées sur les diodes.

V.1.4 Courant de fuite des DPHT en fonction de la température

Ces mesures ont été entreprises dans le but de préciser l'origine des diverses composantes du courant de fuite. Pour cela, les composants sont placés dans un banc de mesure dont la température imposée peut varier de l'ambiance à plus de 200°C . Pour un courant de fuite dû à la diffusion des porteurs minoritaires, la variation du courant en inverse avec la température est proportionnelle à n_i^2 (équation 5.1). L'évolution avec la température du courant de génération est proportionnelle à n_i (équation 5.3) à condition de considérer que la durée de vie effective τ varie peu avec la température. Nous avons mesuré le courant de fuite en fonction de la température des quelques diodes du lot DPHT C2 et du lot DPHT C3. Les variations, en fonction de l'inverse de la température absolue, des courants de fuite à - 500 V et -1000 V pour le pavé n°22 de la tranche n°7 du lot DPHT C2 et pour le pavé n°95 (monopoche), le pavé n°22 (bipoche) de la tranche n°18 du lot DPHT C3 sont représentées

dans les figures 5.6 et 5.7

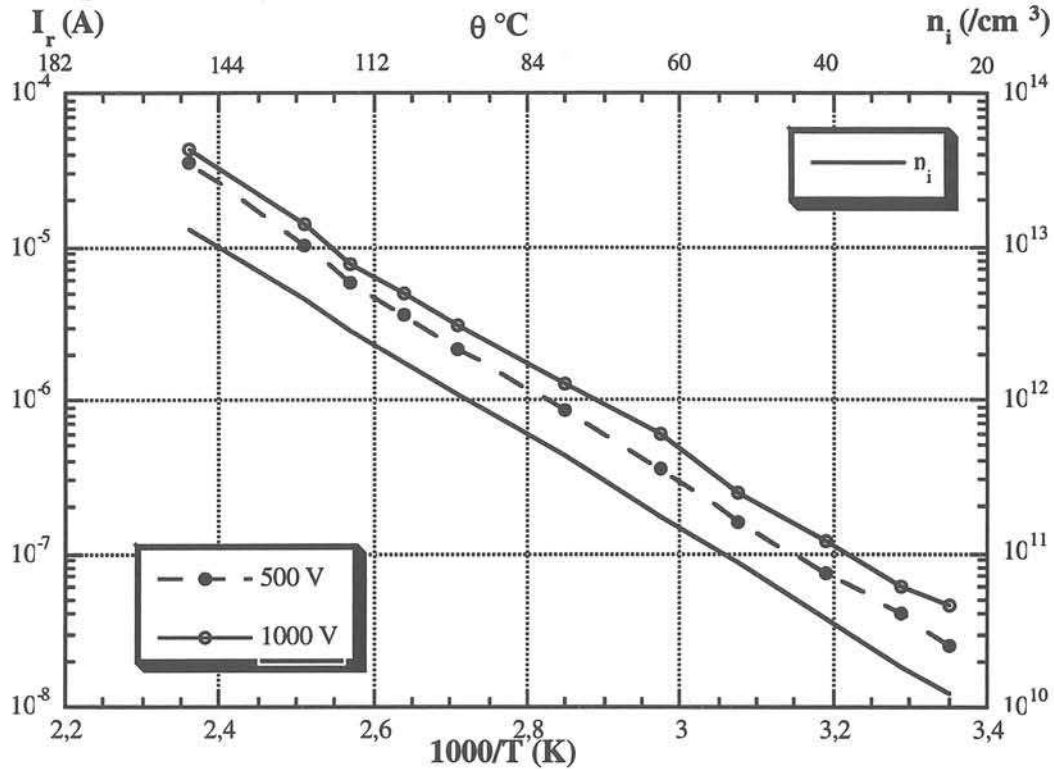


Figure 5.6 : Courant de fuite en fonction de l'inverse de la température absolue à 500 V et 1000 V pour un motif monopoeche (pavé n°22 de la tranche n°7 DPHT C2)

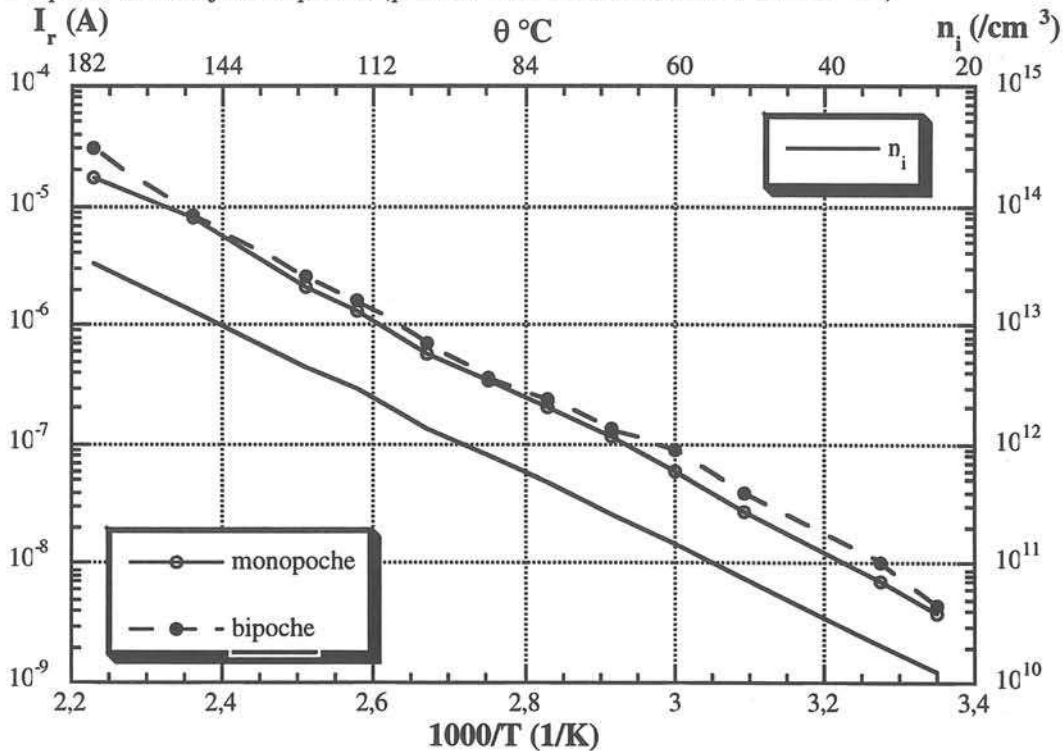


Figure 5.7 : Courant de fuite en fonction de la température à 1000 V pour les motifs monopoeche n°95 et bipoeche n°22 de la tranche n°18 du lot DPHT C3 avec les doses actives $Q^*\pi_2 = 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$; $Q^*\pi_1 = 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$

Nous avons observé que l'évolution du courant de fuite I_f en régime de polarisation inverse à 500 V et 1000 V varie approximativement comme la concentration intrinsèque n_i dans la gamme de température de 25°C à 115°C. Cette variation confirme que dans cette gamme de température le courant de fuite est essentiellement un courant de génération dans la zone de charges d'espace. A partir de 115°C le courant de fuite ne semble plus suivre celle du n_i mais un peu plus rapide (environ $n_i^{1,2}$) pour peut être se rapprocher de n_i^2 . Ce comportement est classique pour une jonction PN. A plus haute température le courant de diffusion dans les régions neutres est dominant [2].

Normalement le courant de génération volumique est proportionnel à la largeur de la zone de charges d'espace W donc proportionnel à $\sqrt{|U|}$. Ici en passant d'une tension inverse de 500V à 1000V, le courant de fuite est multiplié par $\sqrt{2}$.

En supposant être en présence d'un seul niveau de centres profonds placé au milieu de la bande interdite, on sait que le courant de génération s'écrit: $J_{\text{Géné}} = -qW \frac{n_i}{2\tau}$. A partir des courbes de courant de fuite en fonction de la température, nous avons alors calculé la durée de vie de génération des porteurs (τ) pour chaque température. Les variations de la durée de vie de génération en fonction de la température pour le pavé n°22 de la tranche n°7 du lot DPHT C2 et pour les pavés n°95 et n°22 de la tranche n°18 du lot DPHT C3 sont présentées dans les figures 5.8 et 5.9.

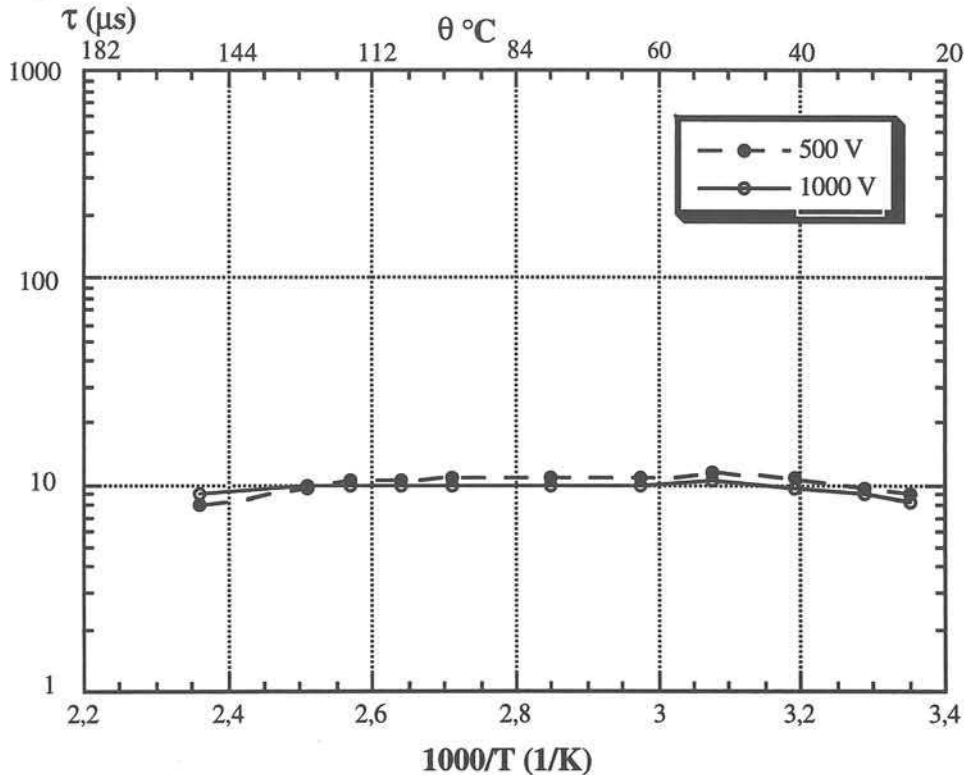


Figure 5.8 : Evolution de la durée de vie de génération τ des porteurs en fonction de la température à tension inverse appliquée de 500 V et 1000 V pour le pavé n°22 de la tranche n°7 du lot DPHT C2

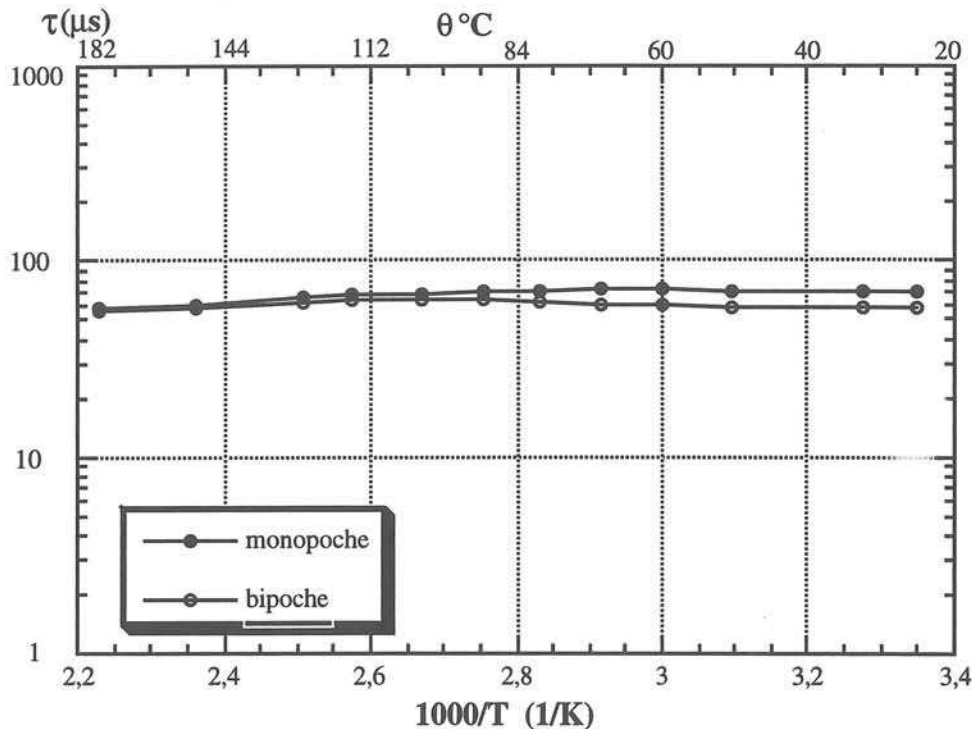


Figure 5.9 : Evolution de la durée de vie de génération τ des porteurs en fonction de la température à tension inverse appliquée de 1000 V. Motifs monopoeche et bipoeche de la tranche n° 18 DPHT C3

Les courbes représentées figure 5.8 et 5.9 montrent une faible dépendance avec la température de la durée de vie de génération. La durée de vie est de l'ordre de 10 μs pour tranche n°7 du lot DPHT C2 et 60 μs pour tranche n°18 du lot DPHT C3.

Comme nous l'avons remarqué dans paragraphe §IV.2.2, en testant sous pointes la tension de claquage pour les diodes du lot DPHT C3, nous avons rencontré le problème d'instabilité du courant de fuite à haute tension. Pour limiter ce phénomène nous avons envisagé de recouvrir la surface du composant par les matériaux diélectriques passivants.

V.1.5 Implantation Phosphore

Les premiers résultats de tenue en tension des DPHT ont montré que toutes les jonctions P^+vN^+ présentaient des courants de fuite assez importants.

Ce phénomène est essentiellement attribué à des impuretés métalliques très mobiles et très "solubles" à haute température. Elles peuvent facilement pénétrer dans le silicium lors des différents traitements thermiques comme oxydation, diffusion. Pendant le retour à la température ambiante, le coefficient de solubilité des impuretés diminue fortement. Elles se trouvent alors piégées dans les lacunes du silicium (en interstitiel le plus souvent) sous

forme de précipités. Les techniques généralement utilisées pour diminuer ces courants de fuite sont connues sous le nom de "Restauration" [69].

En technologie de microélectronique, il est connu que l'effet de restauration du phosphore sur les défauts volumiques peut s'exercer sur des distances très grandes ($> 100 \mu\text{m}$). Il est donc apparu intéressant d'examiner l'influence de phosphore implanté avant la métallisation sur la face arrière de la tranche et dans l'oxyde sur le courant de fuite.

Cette implantation de phosphore à haute température en face arrière permet de créer une couche très dopée où sont attirées les impuretés métalliques indésirables présentes dans le silicium: ainsi on "nettoie" le silicium par la face arrière.

Nous avons effectué une manipulation dite "4 quarts" sur les tranches n°4, n°8, n°12, n°14 du lot DPHT C2 pour étudier l'effet sur le courant de fuite de phosphore implantée en face arrière et en face avant (dans l'oxyde et dans l'ouverture "OCON" du P⁺ central) des diodes juste avant leur métallisation (figure 5.10) avec la dose implantée de $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ et l'énergie de 120 keV. Les tranches ont un recuit à 1025° C sous oxygène pendant 30 mn.

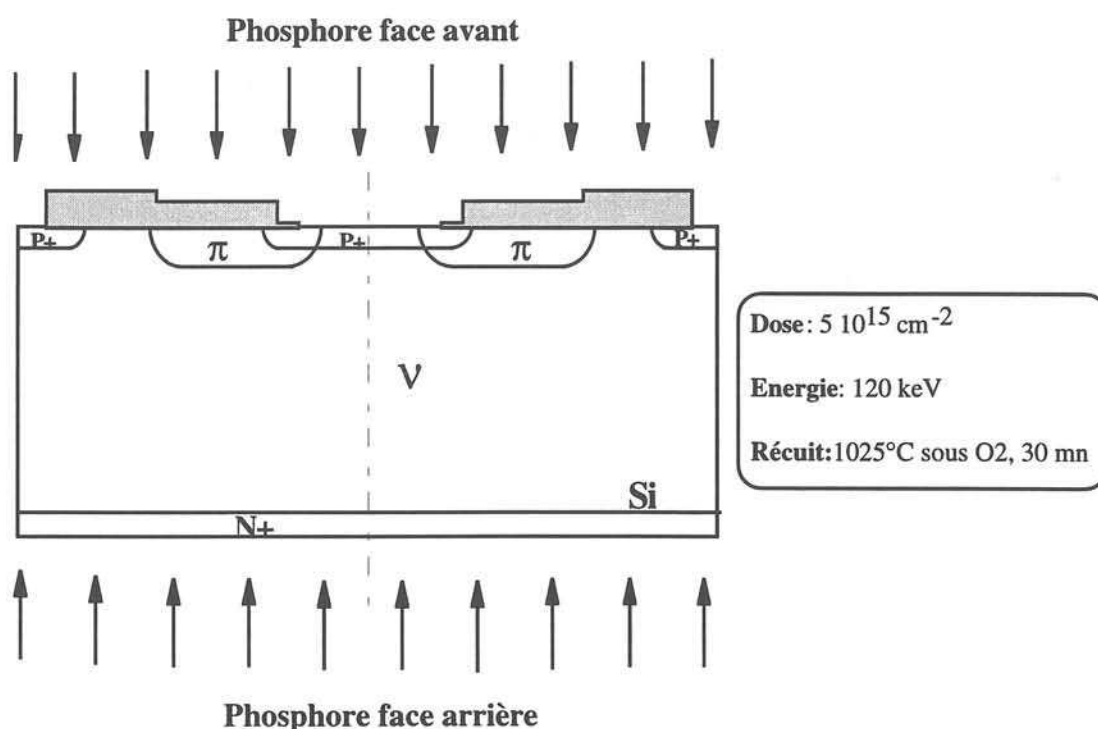
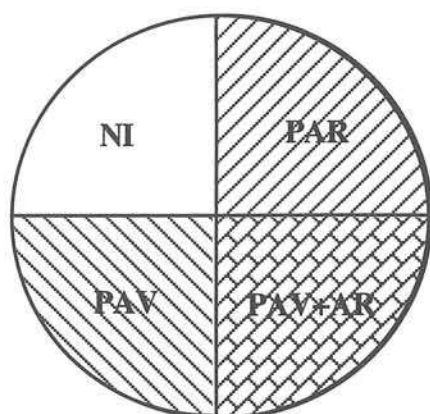


Figure 5.10: Implantation de phosphore en faces avant et arrière pour le cycle "4 quarts"

Pour chaque tranche du cycle "4 quarts" les implantations de phosphore sont effectuées sur des moitiés de tranche en face avant et en face arrière décalé de 90°. Sur la même tranche, nous disposons de différentes diodes avec ou sans phosphore en face avant (NI, PAV) et avec et sans phosphore en face arrière; ce qui définit les quatre zones suivantes.



NI: sans implantation P

PAV: implantation phosphore Face Avant

PAV+ AR: implantation phosphore face Avant et Arrière

PAR: implantation phosphore Face Arrière

Figure 5.11: Différents types de diodes de la manipulation "4 quarts"

Les mesures des longueurs de diffusion et des courants de fuite à - 100 V sur les diodes après l'implantation phosphore et recuit, avant GALU pour les quatre tranches (N° 4, 8, 12, 14 du lot DPHT C2) de manipulation "4 quarts" ont été effectuées à la faculté de St Jérôme (Marseille, laboratoire DSO). Ces résultats des mesures sur chaque tranche sont présentés dans les tableaux de l'annexe 5.1; les résultats avec médiane des longueurs de diffusion et des courants de fuite par chaque "quart" pour chaque tranche du lot DPHT C2 sont résumés dans la figure 5.12

	NI	PAV	PAV+AR	PAR
<u>Tranche N°4</u>				
L _{diff} (μm) médiane	<18>	<33>	<61>	<24>
I _r (nA) médiane	<500>	<270>	<98>	<230>
(mesuré à -100V)				
<u>Tranche N° 8</u>				
L _{diff} (μm) médiane	<58>	<89>	<113>	<91>
I _r (nA) médiane	<71>	<97>	<59>	<37>
(mesuré à -100V)				
<u>Tranche N°12</u>				
L _{diff} (μm) médiane	<54>	<33>	<61>	<24>
I _r (nA) médiane	non fait	non fait	non fait	non fait
(mesuré à -100V)				
<u>Tranche N°14</u>				
L _{diff} (μm) médiane	<101>	<98>	<151>	<132>
I _r (nA) médiane	<190>	<118>	<22>	<87>
(mesuré à -100V)				

Figure 5.12 : Récapitulatif des longueurs de diffusion à - 100V et des courants de fuite à -100 V mesurés sur la tranche n°4, 8, 12, 14 du lot DPHT C2 de manipulation "4 quarts".

A partir de ces résultats nous pouvons classer les meilleures diodes par longueurs de diffusion et courants de fuite. Ce sont les diodes avec l'implantation de Phosphore faces AV et AR qui présentent les meilleurs résultats. Les courants de fuite des diodes avec implantation de Phosphore en face arrière sont diminués d'environ d'un rapport de 2 vis-à-vis de ceux des diodes sans implantation de Phosphore. Ce fait confirme l'effet du Phosphore implanté en face arrière dans son rôle de "restauration" pour diminuer le courant de fuite. Par contre, l'effet de Phosphore en face avant est plus difficile à quantifier. Pour certaines tranches comme n°4, n°14 le courant de fuite diminue quand on implante du phosphore en face avant. Mais cette tendance n'est pas la même avec la tendance pour les longueurs de diffusion.

V.1.6 Implantation Bore

Le but est d'étudier l'influence du Bore implanté dans l'oxyde sur le courant de fuite. Chaque lot de DPHT C3 comporte deux tranches et toutes subissent une implantation Bore pour la réalisation du P⁺ central. On profite de cette portunité pour laisser ou non la résine utilisée à la gravure DIFP⁺. Pour chaque lot une tranche est avec résine (pas de Bore dans SiO₂) et l'autre sans (Bore dans SiO₂). Les courants de fuite ont été mesurés pour les valeurs des tensions inverses continues de 500 V à 1500 V.

Les résultats obtenus sont représentés figure 5.13 (les valeurs de courant indiquées sont des moyennes sur une dizaine de diodes des tranches n°18 et n°19 du lot DPHT C3).

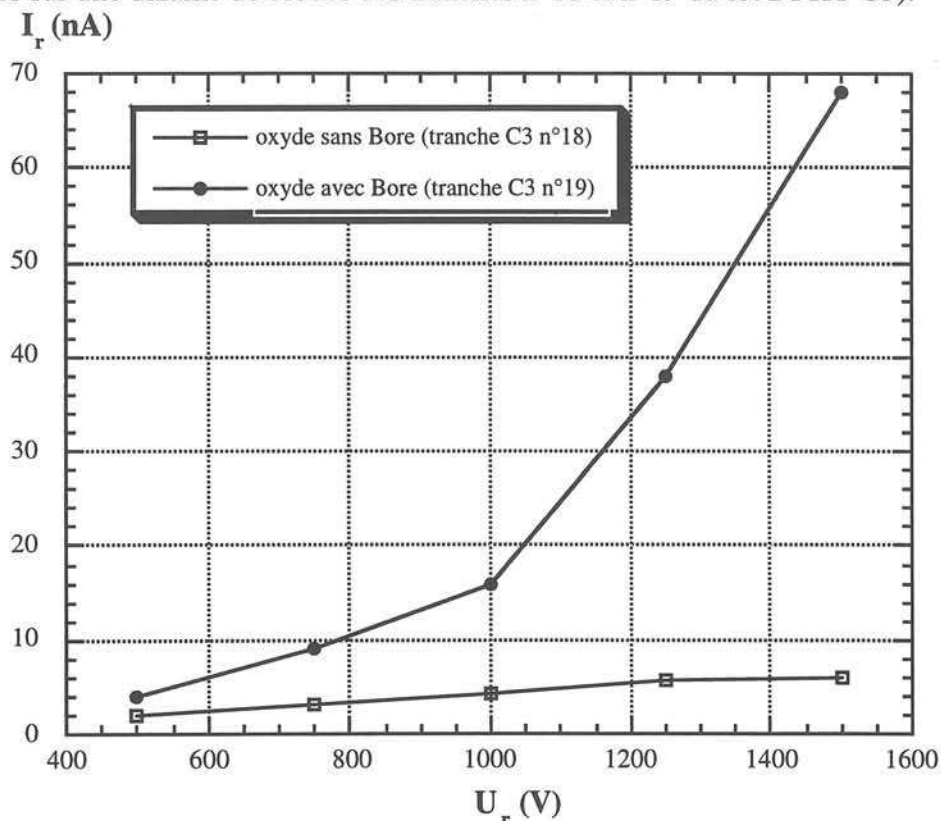


Figure 5.13 : Courants de fuite des diodes sans et avec Bore dans oxyde des tranches n° 18 et n°19 du lot DPHT C3.

Nous pouvons noter l'influence défavorable de cette implantation de bore sur les courants de fuite, surtout aux fortes tensions inverses. A 1500 V, il y a un rapport 17 entre les deux tranches.

Cependant, il convient d'être prudent dans l'interprétation des résultats. En effet, seules deux tranches ont pu être testées. Pour les autres, qui n'ont pas été métallisées en même temps, les courants de fuites étaient instables et non reproductibles.

En conclusion, par la simulation électrique et des mesures des courants de fuite des différentes diodes nous avons pu mettre en évidence l'influence de la qualité d'oxyde et de l'interface SiO_2/Si sur les courants de fuite, très sensibles au processus de fabrication du composant.

V.2 INFLUENCE DES CHARGES DANS L'OXYDE DE SURFACE SUR LA TENUE EN TENSION DES DPHT

Les résultats du paragraphe précédente mettent en évidence l'influence des charges dans oxyde sur le courant de fuite des DPHT. Il est donc important étudier ces influences sur la tenue en tension de la périphérie planar en poche.

A partir d'une synthèse de la littérature [1], [2], [31], [34], [36] [45], [46] sur ce sujet, nous pouvons résumer que les charges fixes à l'interface SiO_2/Si sont connues pour être des charges positives. Ces charges créent des charges images négatives à la surface de silicium. L'effet de l'augmentation de la quantité des charges fixes à l'interface équivaut à diminuer la concentration surfacique de la poche π et la couche P^+ .

Les résultats obtenus précédemment montrent que la tenue en tension de la périphérie PLANAR en poche dépend fortement de la dose active de la poche π , et qu'alors, les charges fixes à l'interface SiO_2/Si influent certainement sur la tenue en tension.

Pour étudier la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des charges fixes à l'interface nous avons utilisé les géométries définies pour les structures monopoche et bipoche dans les paragraphes §II.1 et §IV.1 et le logiciel ATLAS/PISCES.

Dans les paragraphes §II.2.2 et IV.1.2 la sensibilité de la tenue en tension pour les périphérie monopoche et bipoche vis-à-vis de la dose active de la poche était traitée avec la valeur des charges fixes N^*_f ($N^*_f = Q^*_f/q$) à l'interface SiO_2/Si constante égale à 10^{10} cm^{-2} et imposée par défaut d'autre instruction.

Dans la présente étude de la sensibilité, cette grandeur varie volontairement cette fois, de 10^{10} cm^{-2} à 10^{12} cm^{-2} .

V.2.1 Influence des charges fixes positives à l'interface SiO₂/Si sur la tenue en tension de la périphérie monopoche

Dans cette partie de l'étude on traite la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des charges fixes à l'interface SiO₂/Si pour la structure monopoche.

Deux configurations ont été étudiées. La première correspond à la structure monopoche optimale ($Q^*\pi_{opt} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $x_{j\pi} = 12 \text{ }\mu\text{m}$). La seconde est avec une dose active supérieure à la dose active optimale ($Q^*\pi = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $x_{j\pi} = 12 \text{ }\mu\text{m}$).

Les résultats des simulations sont présentés figure 5.14.

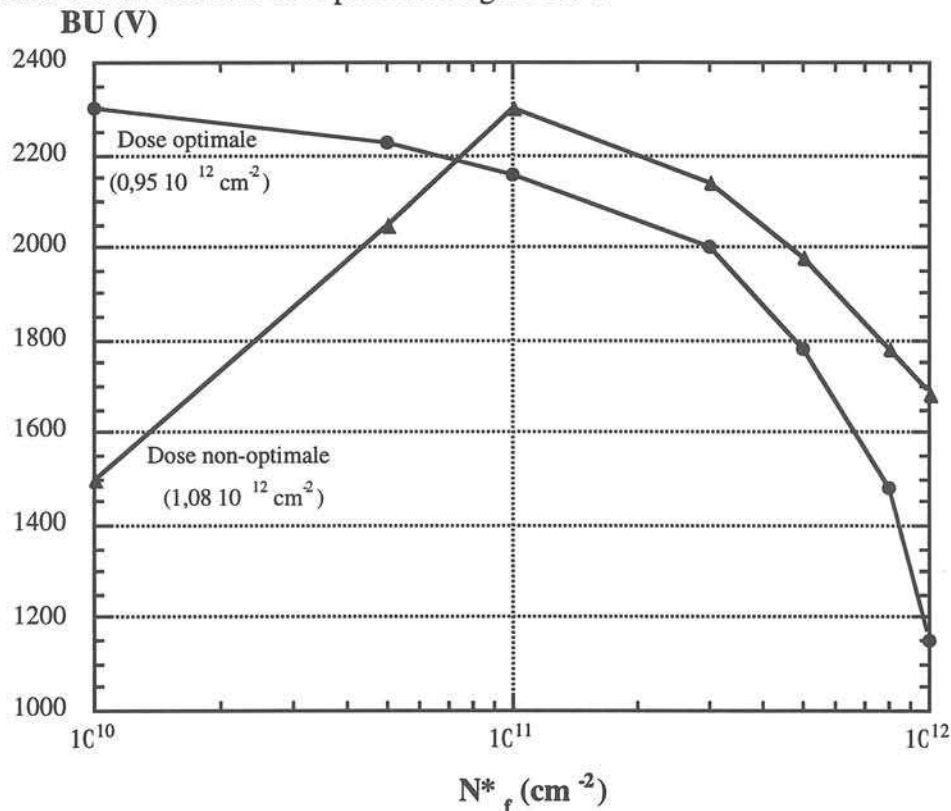


Figure 5.14 : Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des charges fixes positives pour $x_{j\pi} = 12 \text{ }\mu\text{m}$ et le substrat $N \text{ } 100 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$. Structure monopoche optimale: $Q^*\pi_{opt} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et non-optimale: $Q^*\pi = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (simulation).

On voit que selon la valeur de la dose active de poche, l'influence des charges fixes positives sur la tenue en tension est différente. En effet, pour la structure monopoche optimale, les charges fixes positives d'interface SiO₂/Si ont tendance à faire comme si le dopage en surface de la poche π diminuait, ce qui se traduit par un resserrement des équipotentielles en surface. En conséquence la tension de claquage diminue lorsque les valeurs des charges fixes positives augmentent. Il existe une chute de la tension de claquage de l'ordre de 30% lorsque la densité des charges atteint $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

Cependant, la structure monopoche non optimale avec une dose active de la poche π plus grande que la dose active optimale, peut devenir optimale quand la valeur des charges fixes

augmente.

En effet, cette structure de poche ($x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*\pi = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, substrat N $100 \Omega\cdot\text{cm}$) est devenue optimale quand la valeur des charges fixes positives est égale à 10^{11} cm^{-2} soit très approximativement en une sorte d'équivalent implanté la valeur $Q^*\pi_{eq} \# (1,08 - 0,1) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \# 0,98 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. La tension de claquage s'améliore ainsi de 1500 V à 2300 V en variant les charges fixes positives de 10^{10} à 10^{11} cm^{-2} .

Il est clair que plus la dose active est grande, plus la valeur des charges fixes pour optimiser cette structure est importante. Ce phénomène peut être expliqué par l'effet des charges images "diminuant" le dopage de la poche. Pour cela on a étudié les tendances de variation du champ électrique en fonction des charges fixes à l'interface SiO_2/Si dans les trois zones sensibles retenues précédemment : zone extérieure (point E), zone d'interface P^+/π (point C), zone intérieure sous P^+ (point I) en fonction des charges fixées en surface SiO_2/Si pour des structures monopoches optimales et non optimales.

Pour la structure monopoeche optimale ($Q^*\pi_{opt} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$) les répartitions du champ électrique maximum dans les trois zones sensibles en fonction des charges à l'interface SiO_2/Si se présentent dans la figure 5.15.

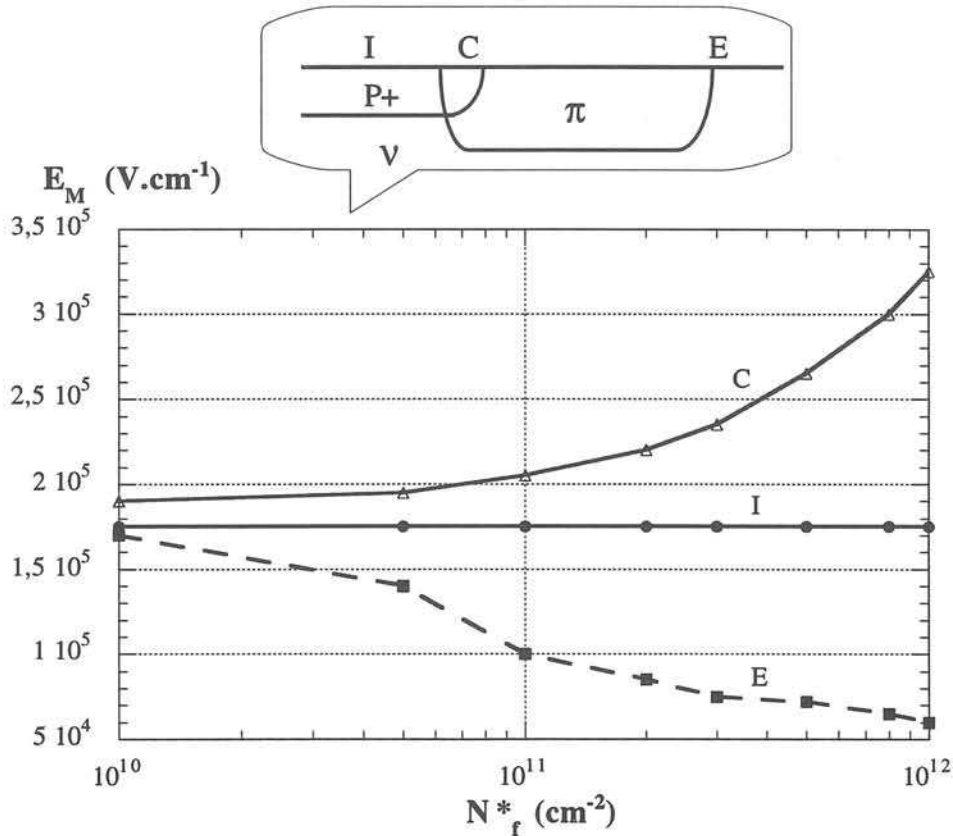


Figure 5.15 : Répartition du champ électrique maximum dans les trois zones sensibles (I, E, C) en fonction des charges fixes positives pour la périphérie monopoeche optimale: $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$ et le substrat N $100 \Omega\cdot\text{cm}$, $Q^*\pi_{opt} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Tension inverse appliquée = 2300 V (simulation).

Nous voyons que si la valeur des charges N^*_f augmente, le champ électrique au point (E) diminue, le champ électrique au point (I) reste constante (comme on pouvait s'y attendre), mais le champ électrique au point (C) augmente. Alors, le point de claquage est obligé de se situer à la zone d'interface P^+/π (C) et la tension de claquage de diminuer lorsque la valeur des charges fixes augmente.

Pour la structure monopoeche non optimale ($Q^*\pi_{opt} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $x_j\pi = 12 \mu\text{m}$), les répartitions du champ électrique maximum dans les trois zones sensibles en fonction des charges à l'interface SiO_2/Si sont présentées figure 5.16. Nous voyons que si la valeur de charges N^*_f augmente, le champ électrique au point (E) a tendance à diminuer, mais le champ électrique du point (C) a tendance à d'augmenter. Quand la valeur des charges fixes positives a dépassé la valeur de $2 \text{ à } 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, le champ électrique au point (C) varie fortement. Dès que N^*_f égale $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, il devient plus grand que celui du point (E). Le champ électrique au point (I) reste constant lors de l'augmentation des charges fixes. Le point de claquage se déplace de zone extérieure du point (E) vers la zone d'interface P^+/π , du point (C) quand les charges fixes positives augmentent. La tension de claquage est maximale quand $N^*_f = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

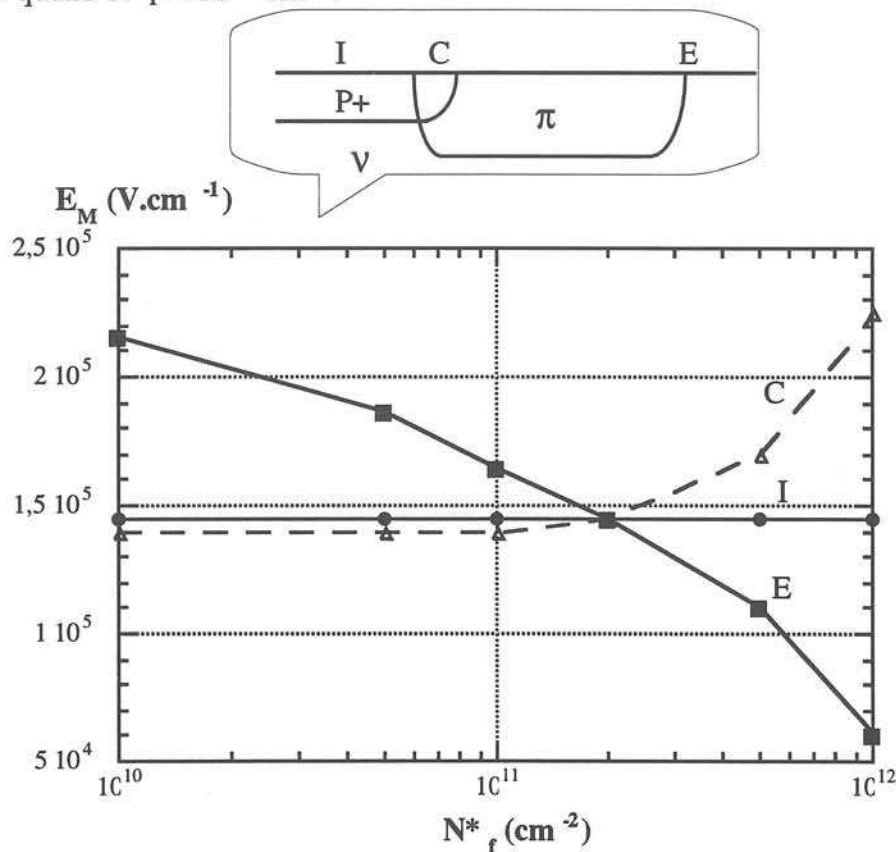


Figure 5.16 : Répartition du champ électrique maximum dans les trois zones sensibles (I, E, C) en fonction des charges fixes positives pour la périphérie monopoeche non optimale: $x_j\pi = 12 \mu\text{m}$ et le substrat $N \ 100 \ \Omega.\text{cm}$, $Q^*\pi_{opt} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Tension inverse appliquée = 1550 V (simulation).

V.2.2 Influence des charges fixes positives à l'interface SiO₂/Si sur la tenue en tension de la périphérie bipoche

Dans l'étude de la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des charges fixes à l'interface SiO₂/Si pour la structure bipoche comme dans l'étude pour la structure monopoeche la valeur des charges fixes positives d'interface varie de 10^{10} cm^{-2} à 10^{12} cm^{-2} . Deux configurations de périphérie bipoche ont été étudiées. La première correspond à la structure bipoche optimale ($x_{j\pi 1} = x_{j\pi 2} = 12 \text{ } \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi 2\text{opt}} = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $Q^*_{\pi 1\text{opt}} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$); la seconde correspond à une structure bipoche non optimale ($x_{j\pi 1} = x_{j\pi 2} = 12 \text{ } \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi 2} = 4,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $Q^*_{\pi 1} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$).

Les deux structures monopoeche et bipoche sont optimisées à faible valeur des charges fixes (10^{10} cm^{-2}). En augmentant celles - ci, les sensibilités de la tenue en tension vis-à-vis des charges fixes ont le même tendance. La tension de claquage diminue en augmentant les charges fixes (figure 5.17). L'influence des charges fixes sur la tenue en tension pour les deux structure monopoeche et bipoche est nette à partir de la valeur 10^{11} cm^{-2} . Pour des charges fixes variant de 10^{10} cm^{-2} à 10^{12} cm^{-2} la tension de claquage diminue presque d'un facteur 2.

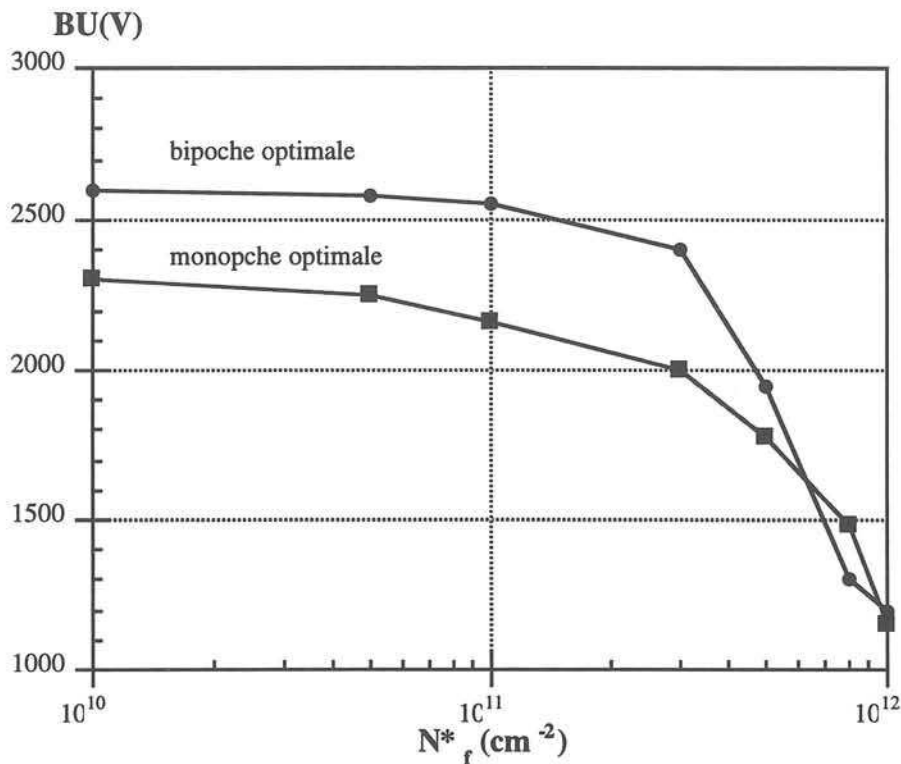
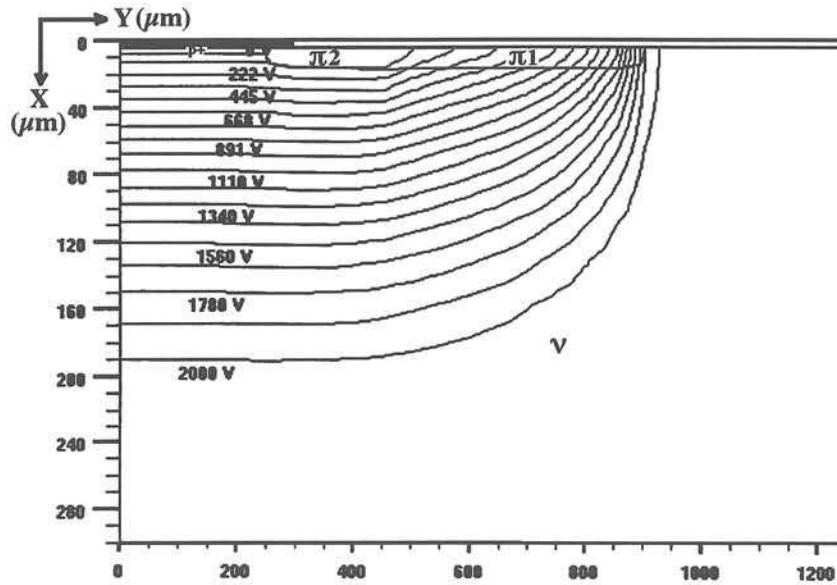
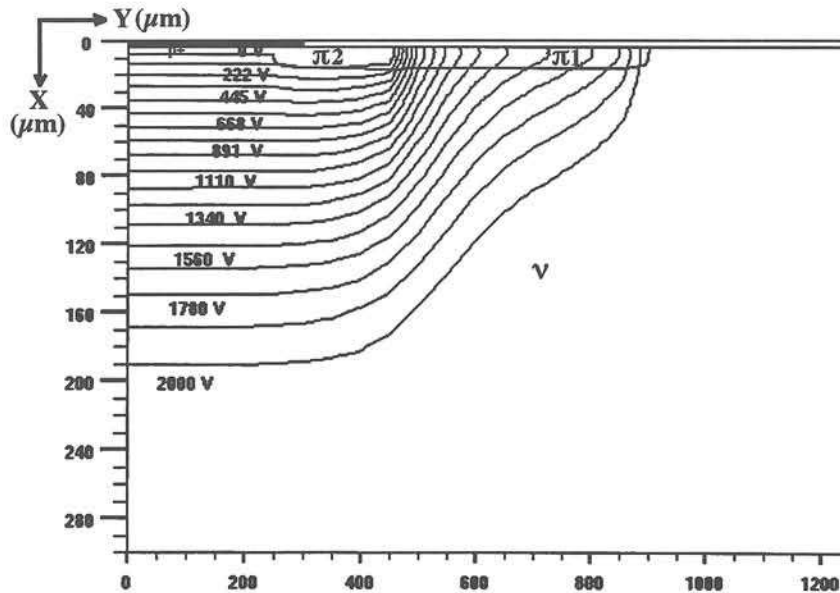


Figure 5.17 : Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des charges fixes positives N^*f pour le substrat $N \ 100 \ \Omega \cdot \text{cm}$. Structure monopoeche optimale: ($x_{j\pi} = 12 \text{ } \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi\text{opt}} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) et bipoche optimale ($x_{j\pi 2} = x_{j\pi 1} = 12 \text{ } \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi 2\text{opt}} = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $Q^*_{\pi 1\text{opt}} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) (simulation).

Comme pour la structure monopoeche optimale, l'augmentation des charges fixes positives dans l'oxyde dans la structure bipoeche optimale influence la répartition des lignes équipotentiellles. La figure 5.18 présente un resserrement des équipotentiellles provoqué par augmentant des charges fixes positives (de $5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ à $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$).



(a): $N^*f = 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$



(b) : $N^*f = 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

Figure 5.18 : Répartition des lignes équipotentiellles dans la périphérie bipoeche optimale. Tension fictive inverse appliquée = 2000V pour 2 cas des charges fixes positives à l'interface SiO_2/Si avec $x_j\pi = 12 \mu\text{m}$ et substrat $100 \Omega.\text{cm N}$.

Courbe (a): $N^*f = 5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, Courbe (b): $N^*f = 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, (simulation).

Cet effet est équivalent à une augmentation du champ en volume (figure 5.19).

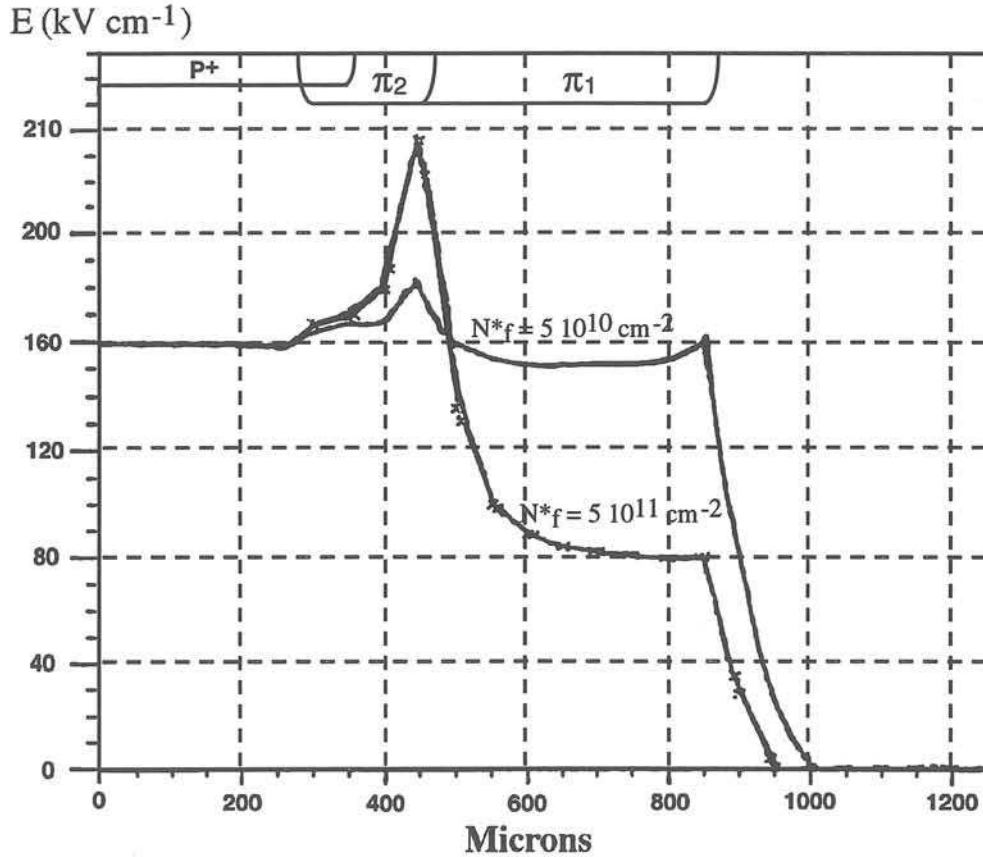


Figure 5.19 : Distributions de champ en volume de la périphérie bipoche optimale ($x_{j\pi1} = x_{j\pi2} = 12 \mu m$, $Q^*_{\pi2opt} = 2 \cdot 10^{12} cm^{-2}$, $Q^*_{\pi1opt} = 0,95 \cdot 10^{12} cm^{-2}$ substrat N de $100 \Omega.cm$). Tension fictive inverse appliquée = 2000 V pour 2 cas des charges fixes positives à l'interface SiO_2/Si (simulation).

Nous voyons que, pour la structure bipoche optimisée pour de faibles valeurs des charges fixes positives, cette structure est très sensible à l'effet de leur augmentation (figure 5.18). Pour la faible valeur $5 \cdot 10^{10} cm^{-2}$, la poche extérieure ($\pi1$) supporte la plus grande partie de la tension inverse (figure 5.18 a), le champ électrique y est distribué de façon homogène (figure 5.19).

Pour la grande valeur des charges fixes ($5 \cdot 10^{11} cm^{-2}$), la poche extérieure ($\pi1$) est devenue "moins dopée", les lignes équipotentiels sont plus resserrées à l'interface $P^+/\pi2$ (figure 5.18b) et donc le champ électrique augmente dans cette zone (figure 5.19).

La valeur du champ maximum augmente de 30% pour une variation de N^*_f allant de $5 \cdot 10^{10} cm^{-2}$ ($1,8 \cdot 10^5 V.cm^{-1}$) à $5 \cdot 10^{11} cm^{-2}$ ($2,4 \cdot 10^5 V.cm^{-1}$).

Cet effet réduit la tension de claquage de la structure bipoche optimale de 2580V à 1950V soit 600 V de diminution de la tenue tension du dispositif (figure 5.17).

Pour la structure bipoche non-optimale ($x_{j\pi 2} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi 2} = 4,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $x_{j\pi 1} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi 1} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ substrat N, $100 \Omega\cdot\text{cm}$) la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des charges fixes positives est présentée sur la figure 5.20 avec encore en référence la monopoche d'origine non-optimale ($x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$).

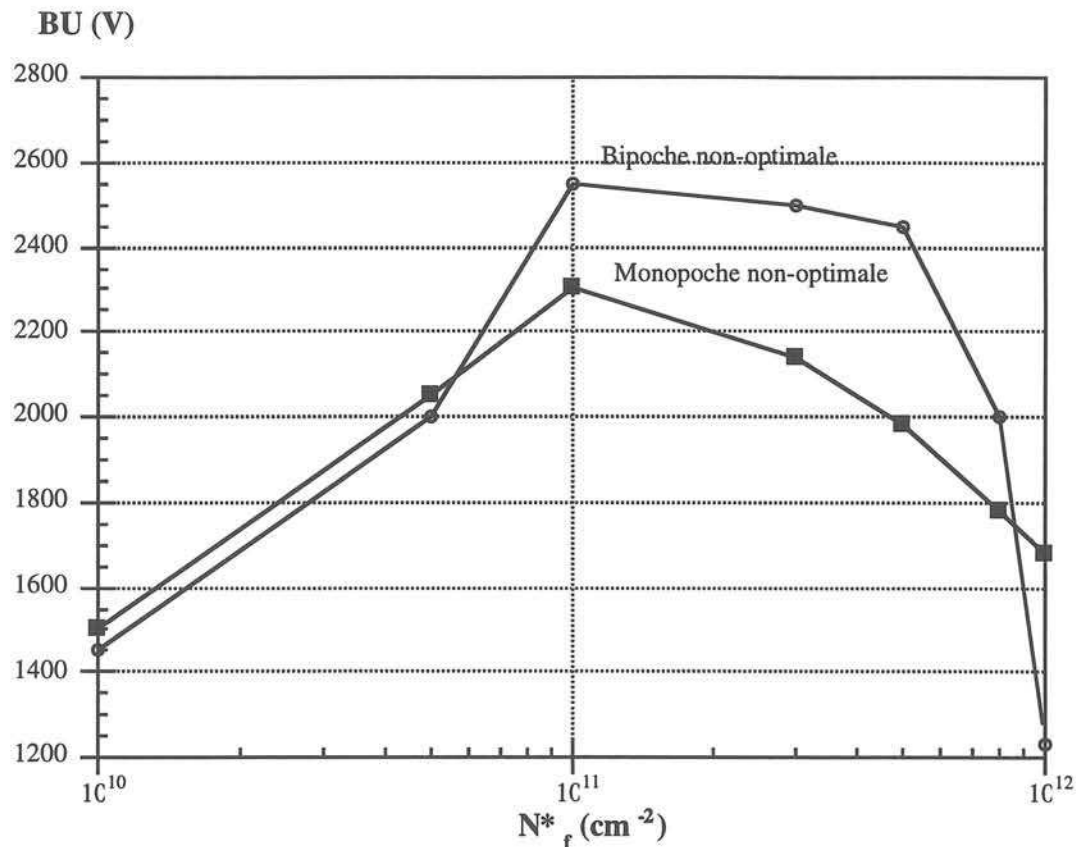


Figure 5.20 : Sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des charges fixes positives N^*_f pour le substrat $100 \Omega\cdot\text{cm}$ type N. Structure monopoche non-optimale : $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et bipoche non-optimale : $x_{j\pi 2} = x_{j\pi 1} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi 2} = 4,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $Q^*_{\pi 1} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ (simulation).

Comme pour la structure monopoche non optimale la structure bipoche non-optimale le devient lorsque l'on augmente la valeur des charges fixes positives. La structure bipoche avec $x_{j\pi 2} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi 2} = 4,6 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, $x_{j\pi 1} = 12 \mu\text{m}$, $Q^*_{\pi 1} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ substrat $100 \Omega\cdot\text{cm}$ type N est devenue optimale quand la valeur des charges fixes positives est égale à 10^{11} cm^{-2} .

CONCLUSION DU CHAPITRE V

La structure des DPHT a été conçue et dimensionnée à partir du calibre en tension souhaité. Les courants de fuite sont alors imposés par les caractéristiques du silicium utilisé et par les étapes technologiques de fabrication. Les résultats des simulations électriques ont permis de

mettre en évidence que les charges dans l'oxyde et à l'interface SiO_2/Si avaient une influence significative sur la tenue en tension et le courant de fuite des diodes haute tension. Nous avons confirmé que la tendance de variation de la tenue en tension en fonction des qualités des charges dans oxyde dépend de la dose active des poches. Pour le cas des poches trop dopées la tenue en tension peut être améliorée par une augmentation des charges dans l'oxyde.

Cependant, pour qualifier l'oxyde, nous ne disposons que de ce paramètre N_f (cm^{-2}). Nous ne pouvons donc pas simuler l'effet de charges mobiles ou la présence de Bore et de Phosphore dans l'oxyde. La simulation ne nous permet pas de trouver des résultats cohérents avec les mesures effectuées sur les diodes.

Par les mesures en fonction de la température nous avons trouvé une variation du courant de fuite proportionnelle de n_i . Ce constat invite à penser que la génération en volume est à l'origine de ce courant de fuite.

Quelques pistes permettant d'améliorer le courant de fuite des diodes haute tension par des traitements finaux comme l'implantation de Phosphore en face arrière ou dans l'oxyde ont été explorées. Cependant, pour détecter complètement l'origine des courants de fuite et les étapes les plus sensibles, il serait nécessaire de contrôler chaque traitement technologique à l'aide de tranches témoins.

De plus, pour connaître la valeur des courants de fuite en surface, il faudrait pouvoir séparer la composante de "volume" et la composante de "surface" de ces courants. Cette séparation est possible en réalisant de diodes de dimensions différentes afin de faire varier le rapport périmètre - surface [69, 70].

Globalement, l'ensemble des résultats obtenus permet d'apporter une nouvelle vision sur le diagramme de cheminement utilisé pour la conception de diodes de puissance. En effet, nous avons entre autres mis en évidence que l'utilisation comme masque pour l'implantation de l'oxyde thermique avait de lourdes conséquences sur le niveau de courant de fuite des composants réalisés. Enfin, au vu des résultats, l'étape finale consistant à implanter une dose de Phosphore dans l'oxyde de surface a prouvé toute son utilité même si sur le plan de l'analyse son effet reste encore à préciser.

Afin de mieux comprendre l'effet du Bore et du Phosphore sur les caractéristiques de l'oxyde, une étude spécifique a été menée à l'aide d'une structure simple, (d'apparence du moins) et traditionnellement appelée capacité MOS. Cette étude est présentée dans le travail de DEA de C.GILLOT [74].

CONCLUSIONS GENERALES

CONCLUSIONS GENERALES

L'objet de cette étude a consisté dans l'optimisation et réalisation d'une périphérie planar du type poche permettant d'obtenir une tenue en tension dépassant 2000 V.

Parmi les différents paramètres à optimiser, le point le plus important lors de la réalisation d'une périphérie monopoche est la détermination de la dose active optimisée pour que cette périphérie puisse jouer pleinement son rôle de protection. Les résultats de l'étude de la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active de la poche a permis d'établir une méthodologie de conception d'une périphérie monopoche optimale.

La localisation du point de claquage selon la valeur de la dose active est bien expliquée par l'étude de variation du champ électrique en fonction de la tension inverse en périphérie monopoche pour trois doses actives différentes.

Cependant, il existe d'autre paramètres influant largement sur l'efficacité de cette protection. La profondeur de la poche est un facteur important. Son augmentation conduit à des tenues en tension croissantes, quoique les limites technologiques de diffusion de dopant (bore) empêchent de développer notablement cette piste. Il est ainsi difficile d'utiliser entièrement les possibilités offertes par le substrat de silicium, en se rapprochant de la tenue en tension d'une jonction plane parallèle.

La longueur de la poche nous est également apparue comme une caractéristique importante. L'étude des différents projets "1800V", "2200V" et "3000V" prouve qu'une longueur de poche croissante permet d'augmenter la tenue en tension de la périphérie. De plus, nous avons mis en évidence qu'il existe une valeur maximale au delà de laquelle cette longueur n'est plus un paramètre influent.

La simulation des procédés technologiques, a permis d'étudier le rôle des facteurs technologiques (dose, énergie de l'implantation, temps, température et ambiance de diffusion) sur le rendement du procédé de diffusion de la poche. La poche plus profonde demande une phase de diffusion longue et coûteuse en énergie. Les résultats expérimentaux des deux lots DPHT C1 et C2 ont confirmé que la dose implantée pour un processus technologique donné contrôle la tenue en tension de la périphérie. Mais, il existe d'autres variables pouvant compléter l'action de cette dose comme la profondeur x_j ou la concentration en surface $C_{s\pi}$.

Les résultats caractéristiques de tension claquage ont confirmé que la périphérie en poche permet obtenir une tension claquage proche de la valeur idéale de claquage en volume d'une jonction plane à condition que la dose active de celle-ci soit optimisée. Reste que sur le plan technologique, ce paramètre est difficile à contrôler avec précision car il dépend fortement

du diagramme de cheminement de réalisation.

Toutes ces raisons nous ont encouragés à faire l'effort de développer une structure dite bipoche ayant pour but de bien dominer la dose active dans la poche afin de contrôler la distribution en surface du champ électrique. A partir de la structure monopoeche optimale nous avons ajouté une implantation supplémentaire autour de la jonction principale. Les résultats de l'étude de la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis des deux doses actives et de l'optimisation de la répartition des longueurs des poches nous permettent de définir une périphérie bipoche optimale.

Il ressort que cette nouvelle périphérie présente de nombreux avantages. Pour le même cycle de diffusion la tenue en tension de la périphérie bipoche est meilleure que celle de la monopoeche et permet même d'obtenir une fois optimisée la valeur de la tenue en tension en volume pour un substrat donné (substrat N, 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ BU # 2650 V et pour substrat N 140 $\Omega \cdot \text{cm}$ BU # 3300 V).

Cependant, le problème de l'arcage aérien, en surface par conséquent, apparaît lorsque la tension inverse est de l'ordre de 3000 V. Les résultats obtenus après la dépose d'une couche de nitrure de silicium hydrogéné sur l'oxyde laissent à penser que nous pouvons continuer dans cette voie pour résoudre ce problème.

Dans le dernier chapitre, pour compléter notre étude de conception de périphérie planar à poche haute tension nous avons étudié le courant de fuite des différentes diodes réalisées.

A partir des résultats des simulations nous avons mis en évidence que des charges fixes positives dans l'oxyde ou à l'interface avaient une influence sur le courant de fuite et sur la tenue en tension des DPHT. Cependant, le seul paramètre caractérisant globalement ces charges, $N \cdot f$ nombre de charges fixes positives par cm^2 , ne suffit pas pour caractériser la qualité de l'oxyde. La présence des charges mobiles ou des dopants (Bore, Phosphore) jouent aussi sur les caractéristiques en inverse.

Les résultats des caractéristiques du courant de fuite après les traitements finaux comme l'implantation de Phosphore en face arrière de la tranche ou dans l'oxyde ont confirmés l'efficacité de cette technique de "Restauration".

En ce qui concerne la présence du Bore dans l'oxyde après l'étape d'implantation pour la couche P^+ , une augmentation copieuse du courant de fuite a été observée. Néanmoins il est difficile de faire une conclusion globale car nous n'avons pu tester que deux tranches. Pour les autres, les courants de fuite étaient instables et non reproductibles, surtout pour les diodes de très haute tenue en tension.

Globalement, l'ensemble des caractéristiques obtenues sur la tenue en tension et le courant

de fuite confirme que la périphérie en poche semble être très performante pour la réalisation des composants haute tension. Tous ces résultats permettent aujourd'hui de se focaliser sur la partie centrale du dispositif pour optimiser le couple chute de tension direct - temps de recouvrement ceci afin de répondre aux besoins actuels exprimés par les concepteurs de convertisseurs.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- (1) **A. S. GROVE**
"Physique et Technologie des Dispositifs à Semiconducteurs".
Dunod - Paris 1971.
- (2) **S. M. SZE**
"Physics of Semiconductor Devices".
John Wiley 2nd edition. 1985.
- (3) **B. J. BALIGA**
"Modern Power Devices".
Edition John Wiley and sons. 1987.
- (4) **J. L. MOLL**
"Physics of Semiconductors"
Mc Graw Hill, pp. 212 - 222.
- (5) **H. MATHIEU**
"Physiques des Semiconducteurs et des Composants Electroniques"
Masson - Paris 1987.
- (6) **J. ARNOULD, P. MERLE**
"Dispositifs de l'Electronique de Puissance".
HERMES 1992.
- (7) **A. G. CHYNOWETH**
"Ionization Rates for Electrons and Holes in Silicon"
Phys.Rev., Vol. 109, 1958, pp. 1537 - 1540.
- (8) **J. L. MOLL and R. VAN OVERSTRAETEN**
"Charge Multiplication in p - n Junctions".
Solid State Electronics, Phys. Rev. Vol. 6, pp 583 - 608, 1963.
- (9) **C. A. LEE and al**
"Ionization Rates of Holes and Electrons in Silicon".
Phys. Rev., Vol. 134 A, pp 761 - 773, 1964.

- (10) **W. FULOP**
“Calculations of Avalanche Breakdown Voltages of Silicon p - n Junctions”.
Solid State Electronics Vol.10, pp39 - 43, 1967.
- (11) **VAN OVERSTRAETEN R. and DE MAN H.**
“Measurement of the Ionization Rates in Diffused Silicon p - n Junctions”.
Solid State Electronics Vol.13, N°9, pp 583 - 608, 1970.
- (12) **S. M. SZE and G. GIBBONS**
“Effect of Junction Curvature on Breakdown Voltage in Semiconductors”.
Solid State Electronics Vol.9, N°9, pp 831 - 845, 1966.
- (13) **V. A. K.TEMPLE, and M. S. ADLER**
“Calculation of the Diffusion Related Avalanche Breakdown in High - Voltage planar p - n junction”.
IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED22, N°10, 1975, pp 910 - 916.
- (14) **B. J. BALIGA and S. K. GHANDHI**
“Analytical Solutions for the Breakdown Voltage of Abrupt Cylindrical and Spherical Junction”
Solid State Electronics N°19, pp 739 - 744, 1976.
- (15) **C. BASAVANAGROUD and K. N. BHAT**
“Effect of Lateral Curvature on Breakdown Voltage of Planar Diode”.
IEEE Trans. on Electron Devices letters, Vol EDL6, N°6, June 1985.
- (16) **D. R. DECKER and C. N. DUNN**
“Temperature Dependence of Carrier Ionization Rates and Saturated Velocities in Silicon”
J. Electronic Materiel, Vol.4, pp 527 - 547, 1975.
- (17) **M. S. ADLER, V. A. K.TEMPLE and R.C. RUSTAY**
“Theoretical Basis for Field Calculation on Multi - Dimensional Reverse Biased Semiconductor Devices”.
Solid State Electronics Vol.25, N°12, 1982, pp 1179 - 1186.
- (18) **F. CONTI and M. CONTI**
“Surface Breakdown in Silicon Planar Diodes Equipped with Field Plate”

Solid State Electronics Vol.15, pp 93 - 105, 1972.

(19) V. A. K. TEMPLE , and M. ADLER

“Enhancement of Breakdown Voltage Using Floating Metal Field Plates”

INT. J. electr., Vol.40, N°3, pp 293 - 303, 1976.

(20) A. RUSU, C. BULUCEA

“Deep - Depletion Breakdown Voltage of Silicon - Dioxide / Silicon MOS Capacitors”

IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.26, N° 3, Mars 1979, pp 201 - 205.

(21) V. P. O'NEIL and P. G. ALONAS

“Relation between Oxide Thickness and the Breakdown Voltage of a Planar Junction with Field Relief Electrode”.

IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.26, N° 7, July 1979, pp 1098 - 1100.

(22) Y. C. KAO and E. D. WOLLEY

“High Voltage Planar p - n Junctions”

Proc.of the IEEE, Vol.55, N° 8, August 1967.

(23) M. ADLER , V. A. K. TEMPLE , A. FERRO and R. C. RUSTAY

“Theory and Breakdown Voltage for Planar Devices with a Single Field Limiting Ring”

IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.24, N° 2, Feb.1977, pp 107 - 112.

(24) K. P. BRIEGER , W. GERLACH and J. PELKA

“Blocking Capability of Planar Devices with Field Limiting Rings”

Solid State Electronics Vol.26, N°8, pp 739 - 745, 1983.

(25) S.MA TERRY and WAYNE B.GRABOWSKI

“Junction Breakdown Analysis of Floating Field - Limiting Ring Structure using a Pisces - 2D Device Simulator”

Solid State Electronics Vol.35, N°2, 1992, pp 201 - 205.

(26) D. JAUME, G. CHARITAT, J. M. REYNES, P. POSSEL

“High - Voltage Planar Devices Using Feld Plat and Semi - Resistive Layers”

IEEE Trans on Electronics Vol.38, N°7, July 1991, pp 1681 - 1684.

- (27) **C. BASAVANA GROUD and K. N. BHAT**
 "Analysis and Optimal Design of Semi - Insulator Passivated High - Voltage Field Plate Structures and Comparison with Dielectric Passivated Structure"
 IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.41, N° 10, Octobre 1994, pp 1856 - 1865.
- (28) **C. BASAVANA GROUD and al**
 "Two - Dimensional Analysis and Design Consideration of High - Voltage Planar Junction Equipped with Field Plate and Guard Ring"
 IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.38, N°7, June 1991.
- (29) **J. KOREC, R. HELD**
 "Comparison of DMOS/IGBT - Compatible High - Voltage Termination Structures and Passivation Technique"
 IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.40, N° 10, Octobre 1993, pp 1845 - 1854.
- (30) **V. A. K. TEMPLE, W. TANTRAPORN**
 "Junction Termination Extension for Near - Ideal Breakdown Voltage in p - n Junction".
 IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.23, N°8, August 1976.
- (31) **K. HWANG, D. NAVON**
 "Breakdown Voltage Optimisation of Silicon Planar Junction Diodes".
 IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.31, N° 9, September 1984, pp 1126 - 1134.
- (32) **S. GEOGESCU, T. DUNCA and al**
 "Planar Termination for High - Voltage p - n Junction"
 Solid State Electronics Vol.29, N°10, pp 1035 - 1039, 1986.
- (33) **S. AHMAD and J. AKHTAR**
 "A Proposed Planar Junction Structure with near Ideal Breakdown Characteristics".
 IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.6, N°9, September 1985, pp 465 - 467.
- (34) **V. BOISSON, M. LE HELLEY, and J. P. CHANTE**
 "Computer Study of a High - Voltage p - p - n⁻ - n⁺ Diode and Comparison with a Field - Limiting Ring Structure"
 IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.31, N°1, January 1986.

(35) J. L SANCHEZ et G. CHARITAT

“Evolution des Techniques de Terminaison de Jonctions pour les Composants Haute Tension Discrets et Intégrables”

L'Onde Electrique - Juillet - Aout 1992 VOL.72 N°4.

(36) V. BOISSON

Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, N°85 - 05, 1985.

“Etude de la Géométrie Optimale des Périphéries des Jonctions Planar”

(37) J. P. GOURRET

Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure de physique de Marseille, Juillet 1986.

“Modélisation bidimensionnelle de dispositifs semiconducteurs de puissance en blocage à haute tension. Conception assistée par ordinateur pour l'étude de leur périphérie”

(38) P. AYEL

Rapport de stage, DESS, EEA Lyon - 1994.

“Simulations électriques et technologiques d'une diode à poche à haute tension”

(39) G. CHARITAT

Thèse de Doctorat d'Etat - science, université Paul Sabatier Toulouse, Sep.1990.

“Modélisation et réalisation de composants planar haute tension”.

(40) V. A. K. TEMPLE

“Increased Avalanche Breakdown Voltage and Controlled Surface Electric Fields using a Junction Termination Extension Technique”

IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.30, N°8, August 1983, pp 954 - 961.

(41) R. STENGL and U. GOSELE

“Variation of Lateral Doping - New Concept to Avoid High Voltage Breakdown of Planar Junctions”

IEEE. IEDM 1985.

(42) R. STENGL, U. GOSELE and al

“Variation of Lateral Doping as a Field Terminator for High - Voltage Power Devices”

IEEE Trans. on Electronics Vol33, N°3, March 1986.

(43) V.A.K.TEMPLE, W.TANTRAPORN

"Junction Termination Extension for Near - Ideal Breakdown Voltage in p - n Junction"

IEEE Trans. on Electron Devices, Vol ED.33, N°10, Octobre 1986, pp 1601 - 1608.

(44) HAN - SOO KIM and al

"Breakdown Voltage Enhancement of the p - n Junction by Self - Aligned Double Diffusion Process through a Tapered SiO₂ Implant Mask"

IEEE Trans. on Electron Devices letters, Vol ED.16, N°9, September 1995.

(45) HAMZA YILMAZ

"Optimisation and Surface Charge Sensitivity of High - Voltage Blocking Structures with Shallow Junctions"

IEEE Trans. on Electronics Vol.38, N°7, July 1991.

(46) P. AUSTIN, J.L. SANCHEZ and R. BERRIANE

"Optimization of PP- Junction Termination for New Power Devices"

Solid State Electronics Vol.39, N°4, pp 593 - 599. 1996.

(47) J. RONALD, G. GOOSSENS and al

"An Automatic Biasing Scheme for Tracing Arbitrarily Shaped I - V Curves"

IEEE Trans. on Computer - Aided design of integrated circuit and systems. Vol.13, NO. 3, March 1994.

(48) V. A. K. TEMPLE and M. ADLER

"The Theory and the Application of a Simple Contour for Near Ideal Breakdown Voltage in Plane and Planar p - n Junction"

IEEE Trans. on Electronics Vol.23, N°8, Aug. 1976, pp 950 - 955.

(49) V. A. K. TEMPLE, B. J. BALIGA and M. ADLER

"The Planar Junction Etch for High Voltage and Low Surface Field Planar Devices"

IEEE Trans. on Electronics Vol. 24, N°11, Nov. 1977.

(50) V. A. K. TEMPLE and M. ADLER

"A Substrate Etch Geometry for Near Ideal Breakdown Voltage in p - n Junction Devices"

IEEE Trans. on Electronics Vol. 24, N°8, Aug. 1977, pp 1077 - 1081.

(51) V. A. K. TEMPLE

"Practical Aspects of the Depletion Etch Method in High Voltage Devices"
IEEE Trans. on Electronics Vol. 27, N°5, May 1980, pp 977 - 982.

(52) T. STOCKMEIER, P. ROGGWILLER

"Novel Planar Junction Termination Technique for High Voltage Power Devices"
ABB Asea Brown Boveri Corporate Research.
Proceeding of 1990 International symposium power semiconductor devices & ICs,
Tokyo, pp. 236 - 239.

(53) Q. HUANG, G. A. J. AMARATUNGA and al

"Simulation of Reverse Breakdown in Planar p - n Junctions"
Solid State Electronics Vol.34, N°9, 1991, pp 983 - 993.

(54) J. F. VERWEY, A. HERINGA, R. DE WERDT and W. V. D. HOFSTAD

"Drift of the Breakdown Voltage in p - n Junctions in Silicon (walkout)"
Solid State Electronics Vol.20, pp 689 - 695. 1977.

(55) KRISHNA C. SARASWAT and JAMES D. MEINDL

"Breakdown Walkout in Planar p - n Junctions"
Solid State Electronics Vol.21, pp 813 - 819. 1977.

(56) S. M. SZE

"VLSI TECHNOLOGY".
Mc Graw - Hill Book Company, 1983.

(57) KIYONORI OHYU, MAKOTO OHKURA

"A Mechanism and a Reduction Technique for Large Reverse Leakage Current in p - n Junctions"
IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 42, N°8, Aug. 1995, pp 1404 - 1412.

(58) J. KASSABOV and D. DIMITROV

"Investigation of the Si - SiO₂ Interface by surface Inversion Currents"
Solid State Electronics Vol.29, pp 477 - 482. 1986.

(59) J. A. APPELS and H. M. J. VAES

"High voltage Thin Layer Devices (RESURF devices)"
In 25th Int. Electron devices meeting, IEEE (1979) pp 238 - 241.

- (60) **J. A. APPELS, H. M. J. VAES and W. N. J. RUIS**
"Thin Layer High Voltage Junction FET (Resurf JFET)"
IEEE Trans. on Electron Devices letters, Vol ED.2, N°2, Feb. 1981, pp 38 - 40.
- (61) **ATLAS 2D** device simulation framework user's manuel.
SILVACO International. 47041 Patrick Henry Drive, Bldg, Santa Clara,
Ca 94054, USA.
- (62) **ATHENA 2D** device simulation framework user's manuel.
SILVACO International. 47041 Patrick Henry Drive, Bldg, Santa Clara,
Ca 94054, USA.
- (63) **SEMICONDUCTOR TECHNOLOGY HANDBOOK**
Technology associates, 1982.
- (64) **B. E. DEAL**
"The Current Understanding of Charges in the Thermally Oxidized Silicon Structure"
Journ. Electrochem. Soc., 121, 1974, pp 198C - 205C.
- (65) **S. PETERSTRÖM**
"Si - SiO₂ Interface Trap Density in Boron - and Phosphorus - Implanted Silicon"
Appl. Phys. Lett. 63, 2. August 1993. pp 672 - 674.
- (66) **A. S. GROVE and D. J. FITZGERALD**
"Surface Effect on p - n Junctions: Characteristics of Surface Space - Charge Regions
under Non - Equilibrium Conditions"
Solid State Electronics Vol.9, 1966. pp 783 - 806.
- (67) **ALVIN B. PHILLIPS**
"Transistor Engineering and Introduction to integrated Semiconductor Circuits"
McGRAW - HILL Book Company, INC. 1962.
- (68) **T. KUROI and al**
"Proximity Gettering of Heavy Metals by High - Energy Ion Implantation"
Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32 (1993) pp. 303 - 307.
- (69) **VISHNU GOPAL**
"A General Relation between zero-bias resistance-area product and Perimeter-to-Area

Ratio of the Diodes in Variable-Area Diode Test Structures”

Semicond. Sci. Technol. 11 (1996) 1070 - 1076.

(70) M. C. OZTURK and al

“Optimization of the Germanium Preamorphization Conditions for Shallow - Junctions Formation”

IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 35, N°5, may 1988, pp 659 - 668.

(71) P. N. FAVENNEC

“Technologies pour les composants à semiconducteurs”

Edition MASSON Paris, 1996.

(72) B. E. DEAL

“Standardized Terminology for Oxide Charges Associated with Thermally Oxidized Silicon”

IEEE Trans. on Electron Devices, Vol. 27, N°3, 1980, pp 606 - 608.

**(73) T. NGO, Ch. SCHAEFFER, N. GUILLEMOT, J. ARNOULD,
L. ROUX**

“Study and Realization of a Novel High-Voltage Planar Periphery”

The 32nd Industry Application society annual meeting, IEEE - IAS (1997)

(74) C. GILLOT

Rapport de stage, DEA, ENSIEG Grenoble - 1997.

“Courants de fuite des diodes à poche haute tension”

ANNEXE

ANNEXE I.1

CALCUL DE ZONE v (PvN OU PvP). Entrée avec tension de claquage

Tension de claquage (V)	Jonction abrupte non tronquée (voir figures 3.6 et 3.7)					Jonction abrupte tronquée optimale (voir figures 3.6 et 3.7)					[v] = jonction abrupte non tronquée sauf W_{PvP} (μm)
	N_M (cm ⁻³)	ρ_M (Ω.cm)	W_M (μm)	E_M (kV.cm ⁻¹)	R_M^0 (Ω.cm ²)	N_{vopt} (cm ⁻³)	ρ_{vopt} (Ω.cm)	W_{vopt} (μm)	$\frac{E_{foye}}{E_{zola}} = \frac{E_{foye}}{(kV.cm^{-1})}$	R_{vopt}^0 (Ω.cm ²)	
	$1,6 \cdot 10^{18} V_M^{-4/3}$	$44 \cdot 10^{14} N_M^{-1}$	$2,86 \cdot 10^{-2} V_M^{-7/6}$	$700 V_M^{-1/6}$	$7,87 \cdot 10^{-9} V_M^{1,3}$ (à 25°C)	$1,47 \cdot 10^{18} V_M^{-4/3}$	$44 \cdot 10^{14} N_M^{-1}$	$2,32 \cdot 10^{-2} V_M^{-7/6}$	$\frac{690 V_M^{1/6}}{172,5 V_M^{-1/6}}$	$6,94 \cdot 10^{-9} V_M^{2,3}$ (à 25°C)	
400	$5,4 \cdot 10^{14}$	8,1	31	258	$25 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{14}$	8,8	25	$\frac{254}{64}$	$22 \cdot 10^{-3}$	39
450	$4,6 \cdot 10^{14}$	9,5	36	253	$34 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{14}$	10,3	29	$\frac{249}{62}$	$30 \cdot 10^{-3}$	45
500	$4 \cdot 10^{14}$	10,9	40	248	$44 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{14}$	11,9	33	$\frac{245}{61}$	$39 \cdot 10^{-3}$	50
550	$3,6 \cdot 10^{14}$	12,4	45	245	$56 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	13,4	36	$\frac{241}{60}$	$49 \cdot 10^{-3}$	56
600	$3,2 \cdot 10^{14}$	13,9	50	241	$69 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{14}$	15,1	40	$\frac{238}{59}$	$61 \cdot 10^{-3}$	63
650	$2,8 \cdot 10^{14}$	15,5	55	238	$85 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{14}$	16,8	44	$\frac{234}{59}$	$75 \cdot 10^{-3}$	68
700	$2,6 \cdot 10^{14}$	17	60	235	0,1	$2,4 \cdot 10^{14}$	18,6	48	$\frac{232}{58}$	0,09	75
750	$2,3 \cdot 10^{14}$	18,7	65	232	0,12	$2,2 \cdot 10^{14}$	20,4	52	$\frac{229}{57}$	0,11	81
800	$2,2 \cdot 10^{14}$	20,4	70	230	0,14	$2 \cdot 10^{14}$	22,2	57	$\frac{226}{57}$	0,12	88
850	$2 \cdot 10^{14}$	22	75	227	0,17	$1,8 \cdot 10^{14}$	24	61	$\frac{224}{56}$	0,15	94
900	$1,8 \cdot 10^{14}$	23,9	80	225	0,19	$1,7 \cdot 10^{14}$	26	65	$\frac{222}{56}$	0,17	100
950	$1,7 \cdot 10^{14}$	25,7	85	223	0,22	$1,6 \cdot 10^{14}$	28	69	$\frac{220}{55}$	0,19	106
1 000	$1,6 \cdot 10^{14}$	27,5	90	221	0,25	$1,5 \cdot 10^{14}$	30	73	$\frac{218}{55}$	0,22	113
1 050	$1,5 \cdot 10^{14}$	29	96	220	0,28	$1,4 \cdot 10^{14}$	32	78	$\frac{218}{55}$	0,25	120
Diode PvN de redressement ; à avalanche contrôlée TJB à V_{SAT} un peu élevé + aire de sécurité améliorée						Diode PvN rapide — TJB optimisé en V_{SAT} — Thyristor et/ou TGB asymétriques rapides — MOS de puissance verticale					Thyr Symétr. TGB ordinaire

ANNEXE I.1

CALCUL DE ZONE v (PvN OU PvP). Entrée avec tension de claquage

Tension de claquage (V)	Jonction abrupte non tronquée (voir figures 3.6 et 3.7)					Jonction abrupte tronquée optimale (voir figures 3.6 et 3.7)					PvP = jonction abrupte non tronquée sauf W_{PvP} (μm)
	N_M (cm^{-3})	ρ_M (Ωcm)	W_M (μm)	E_M (kV.cm $^{-1}$)	R_M^* ($\Omega.cm^2$)	N_{vopt} (cm^{-3})	ρ_{vopt} (Ωcm)	W_{vopt} (μm)	$\frac{E_{Mopt}}{E_{vopt}}$ (kV.cm $^{-1}$)	R_{vopt}^* ($\Omega.cm^2$)	
	$1,6 \cdot 10^{18} V_M^{-4/3}$	$44 \cdot 10^{14} N_M^{-1}$	$2,86 \cdot 10^{-2} V_M^{-7/6}$	$700 V_M^{-1/6}$	$7,87 \cdot 10^{-9} V_M^{1,5}$ (à 25°C)	$1,47 \cdot 10^{18} V_M^{-4/3}$	$44 \cdot 10^{14} N_v^{-1}$	$2,32 \cdot 10^{-2} V_v^{-7/6}$	$\frac{690 V_v^{-1/6}}{172,5 V_v^{-1/6}}$	$6,94 \cdot 10^{-9} V_v^{2,5}$ (à 25°C)	
1 100	$1,4 \cdot 10^{14}$	31,2	101	218	0,32	$1,3 \cdot 10^{14}$	34	82	$\frac{215}{54}$	0,28	126
1 150	$1,3 \cdot 10^{14}$	33	106	216	0,35	$1,2 \cdot 10^{14}$	36	86	$\frac{213}{53}$	0,31	133
1 200	$1,25 \cdot 10^{14}$	35,1	112	215	0,39	$1,15 \cdot 10^{14}$	38,2	91	$\frac{212}{53}$	0,35	140
1 250	$1,2 \cdot 10^{14}$	37	117	213	0,43	$1,1 \cdot 10^{14}$	40,3	95	$\frac{210}{53}$	0,38	147
1 300	$1,1 \cdot 10^{14}$	39	123	212	0,48	$1 \cdot 10^{14}$	42,5	100	$\frac{209}{52}$	0,42	154
1 350	$1,07 \cdot 10^{14}$	41	128	211	0,53	$9,8 \cdot 10^{13}$	44,7	104	$\frac{208}{52}$	0,46	160
1 400	$1 \cdot 10^{14}$	43	134	209	0,58	$9,4 \cdot 10^{13}$	46,9	109	$\frac{206}{52}$	0,51	168
1 450	$9,7 \cdot 10^{13}$	45	140	208	0,63	$9 \cdot 10^{13}$	49,1	113	$\frac{205}{51}$	0,56	174
1 500	$9,3 \cdot 10^{13}$	47,2	145	207	0,69	$8,6 \cdot 10^{13}$	51,4	118	$\frac{204}{51}$	0,6	181
1 600	$8,5 \cdot 10^{13}$	51,5	156	205	0,81	$7,9 \cdot 10^{13}$	56	127	$\frac{202}{50}$	0,71	195
1 700	$7,9 \cdot 10^{13}$	55,8	168	203	0,94	$7,2 \cdot 10^{13}$	60,7	136	$\frac{200}{50}$	0,83	211
1 800	$7,3 \cdot 10^{13}$	60,2	180	201	1,08	$6,7 \cdot 10^{13}$	65,5	146	$\frac{198}{49}$	0,95	225
1 900	$6,8 \cdot 10^{13}$	64,7	191	199	1,24	$6,2 \cdot 10^{13}$	70,4	155	$\frac{196}{49}$	1,09	239
2 000	$6,3 \cdot 10^{13}$	69,3	203	197	1,41	$5,8 \cdot 10^{13}$	75,4	165	$\frac{194}{49}$	1,24	254
Diode PvN de redressement ; à avalanche contrôlée TJB à V_{SAT} un peu élevé + aire de sécurité améliorée						Diode PvN rapide — TJB optimisé en V_{SAT} — Thyristor et/ou TGB asymétriques rapides — MOS de puissance verticale					Thyr Symétr. TGB ordinaire

ANNEXE I.1

CALCUL DE ZONE v (PvN OU PvP).
Entrée avec tension de claquage

Tension de claquage (V)	Jonction abrupte non tronquée (voir figures 3.6 et 3.7)					Jonction abrupte tronquée optimale (voir figures 3.6 et 3.7)					PvP = jonction abrupte non tronquée sauf W _{PvP} (µm)
	N _M (cm ⁻³)	ρ _M (Ω.cm)	W _M (µm)	E _M (kV.cm ⁻¹)	R _M ⁰ (Ω.cm ²)	N _{vopt} (cm ⁻³)	ρ _{vopt} (Ω.cm)	W _{vopt} (µm)	$\frac{E_{Mopt}}{E_{vopt}}$ (kV.cm ⁻¹)	R _{vopt} ⁰ (Ω.cm ²)	
	$1,6 \cdot 10^{13} V_M^{-1/3}$	$44 \cdot 10^{14} N_M^{-1}$	$2,86 \cdot 10^{-2} V_M^{-7/6}$	$700 V_M^{-1/6}$	$7,87 \cdot 10^{-9} V_M^{2,3}$ (à 25°C)	$1,47 \cdot 10^{13} V_M^{-1/3}$	$44 \cdot 10^{14} N_v^{-1}$	$2,32 \cdot 10^{-2} V_v^{-7/6}$	$\frac{690 V_v^{1/6}}{172,5 V_v^{1/6}}$	$6,94 \cdot 10^{-9} V_v^{2,3}$ (à 25°C)	
2 100	5,9 10 ¹³	74	215	196	1,59	5,5 10 ¹³	80,5	174	$\frac{193}{48}$	1,40	269
2 200	5,6 10 ¹³	78,7	227	194	1,79	5,1 10 ¹³	85,6	184	$\frac{191}{48}$	1,58	284
2 300	5,3 10 ¹³	83,5	239	193	2,00	4,8 10 ¹³	90,9	194	$\frac{190}{47}$	1,76	299
2 400	5 10 ¹³	88,4	251	191	2,22	4,6 10 ¹³	96,2	204	$\frac{189}{47}$	1,96	314
2 500	4,7 10 ¹³	93,3	263	190	2,46	4,3 10 ¹³	101,5	214	$\frac{187}{47}$	2,17	329
2 600	4,5 10 ¹³	98,3	276	189	2,71	4,1 10 ¹³	107	224	$\frac{186}{47}$	2,39	345
2 800	4,1 10 ¹³	108,5	301	186	3,26	3,7 10 ¹³	118,1	244	$\frac{184}{46}$	2,88	376
3 000	3,7 10 ¹³	119	326	184	3,88	3,4 10 ¹³	129,5	264	$\frac{182}{45}$	3,42	407
3 200	3,4 10 ¹³	129,7	351	182	4,56	3,1 10 ¹³	141,1	285	$\frac{180}{45}$	4,02	439
3 400	3,1 10 ¹³	140,6	377	181	5,30	2,9 10 ¹³	153	306	$\frac{178}{44}$	4,68	471
3 600	2,9 10 ¹³	151,7	403	179	6,12	2,7 10 ¹³	165,1	327	$\frac{176}{44}$	5,40	504
4 000	2,5 10 ¹³	174,6	456	176	7,96	2,3 10 ¹³	190	370	$\frac{173}{43}$	7,02	570
4 400	2,2 10 ¹³	198,7	509	173	10,11	2 10 ¹³	216	413	$\frac{170}{43}$	8,91	637
4 800	2 10 ¹³	223	564	170	12,56	1,8 10 ¹³	242	457	$\frac{168}{42}$	11,07	705
Diode PvN de redressement ; à avalanche contrôlée TJB à V _{SAT} un peu élevé + aire de sécurité améliorée						Diode PvN rapide — TJB optimisé en V _{SAT} — Thyristor et/ou TGB asymétriques rapides — MOS de puissance verticale					Thyr Synchr. TUB ordinaire

ANNEXE I.2

CALCUL DE ZONE v (PvN OU PvP). Entrée avec résistivité de zone v

Résis- tivité zone v nominale ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Jonction abrupte non tronquée (voir figures 3.6 et 3.7)					Jonction abrupte tronquée optimale (voir figures 3.6 et 3.7)					PvP = jonction abrupte non tronquée sauf W_{PvP} (μm)
	N_M (cm^{-3})	V_M (V)	W_M (μm)	E_M (kV. cm^{-1})	R_M° ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	N_{opt} (cm^{-3})	V_{opt} (V)	W_{opt} (μm)	E_{opt} (kV. cm^{-1})	R_{opt}° ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	
	$44 \cdot 10^{14} \rho_M^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{13} N_M^{-3/4}$	$2,86 \cdot 10^{-2} V_M^{7/6}$	$700 V_M^{-1/6}$ $= 335 \rho_M^{-1/8}$	$7,87 \cdot 10^{-9} V_M^{2,5}$ (à 25°C)	$1,47 \cdot 10^{18} V_v^{-4/3}$	$V_M/1,07$	$0,75 W_M$	E_M $E_M/4$	$0,75 R_M$ (à 25°C)	
10	$4,4 \cdot 10^{14}$	468	37	251	$37,5 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{14}$	438	28	251 63	$28 \cdot 10^{-3}$	47
11	$4 \cdot 10^{14}$	503	41	248	$44,9 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{14}$	470	30	248 62	$33,6 \cdot 10^{-3}$	51
12	$3,7 \cdot 10^{14}$	537	44	245	$52,8 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{14}$	502	33	245 61	$39,6 \cdot 10^{-3}$	55
13	$3,4 \cdot 10^{14}$	570	47	243	$61,3 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{14}$	533	35	243 61	$46 \cdot 10^{-3}$	59
14	$3,1 \cdot 10^{14}$	603	50	241	$70,5 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{14}$	563	38	241 60	$52,9 \cdot 10^{-3}$	63
15	$2,9 \cdot 10^{14}$	635	53	239	$80,2 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{14}$	593	40	239 60	$60,2 \cdot 10^{-3}$	67
16	$2,8 \cdot 10^{14}$	666	56	237	$90,6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{14}$	623	42	237 59	$67,9 \cdot 10^{-3}$	70
17	$2,6 \cdot 10^{14}$	697	59	235	0,101	$2,6 \cdot 10^{14}$	652	45	235 59	$76,1 \cdot 10^{-3}$	74
18	$2,4 \cdot 10^{14}$	728	62	233	0,113	$2,4 \cdot 10^{14}$	680	47	233 58	$84,7 \cdot 10^{-3}$	78
19	$2,3 \cdot 10^{14}$	758	65	232	0,125	$2,3 \cdot 10^{14}$	708	49	232 58	$93,7 \cdot 10^{-3}$	82
20	$2,2 \cdot 10^{14}$	788	68	230	0,138	$2,2 \cdot 10^{14}$	736	51	230 58	0,103	86
22	$2 \cdot 10^{14}$	846	74	228	0,165	$2 \cdot 10^{14}$	790	56	228 57	0,123	93
24	$1,8 \cdot 10^{14}$	903	80	225	0,194	$1,8 \cdot 10^{14}$	844	60	225 56	0,145	100
26	$1,7 \cdot 10^{14}$	959	86	223	0,225	$1,7 \cdot 10^{14}$	896	65	223 56	0,169	108
Diode PvN de redressement ; à avalanche contrôlée TJB à V_{SAT} un peu élevé + aire de sécurité améliorée						Diode PvN rapide — TJB optimisé en V_{SAT} — Thyristor et/ou TGB asymétriques rapides — MOS de puissance verticale					Thyr Symétr. TGB ordinaire

ANNEXE I.2

CALCUL DE ZONE v (PvN OU PvP). Entrée avec résistivité de zone v

Résis- tivité zone v nominale (Ωcm)	Jonction abrupte non tronquée (voir figures 3.6 et 3.7)					Jonction abrupte tronquée optimale (voir figures 3.6 et 3.7)					l'vP = jonction abrupte non tronquée sauf W_{PvP} (μm)
	N_M (cm^{-3})	V_M (V)	W_M (μm)	E_M (kV. cm^{-1})	R_M^0 (Ωcm^2)	N_{opt} (cm^{-3})	V_{opt} (V)	W_{opt} (μm)	E_{opt} (kV. cm^{-1})	R_{opt}^0 (Ωcm^2)	
	$44 \cdot 10^{14} \rho_M^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{13} N_M^{-3/4}$	$2,86 \cdot 10^{-2} V_M^{7/6}$	$700 V_M^{-1/6}$ $= 335 \rho_M^{-1/8}$	$7,87 \cdot 10^{-9} V_M^{2,3}$ (à 25°C)	$1,47 \cdot 10^{18} V_M^{-4/3}$	$V_M/1,07$	$0,75 W_M$	E_M $E_M/4$	$0,75 R_M$ (à 25°C)	$= 1,25 W_M$
28	$1,6 \cdot 10^{14}$	1 014	92	221	0,259	$1,6 \cdot 10^{14}$	948	69	221 55	0,194	115
30	$1,5 \cdot 10^{14}$	1 068	98	219	0,294	$1,5 \cdot 10^{14}$	998	73	219 55	0,221	122
35	$1,3 \cdot 10^{14}$	1 199	118	215	0,393	$1,3 \cdot 10^{14}$	1 120	84	215 54	0,295	140
40	$1,1 \cdot 10^{14}$	1 325	126	211	0,505	$1,1 \cdot 10^{14}$	1 238	94	211 53	0,379	157
45	$9,8 \cdot 10^{13}$	1 447	139	208	0,629	$9,8 \cdot 10^{13}$	1 352	104	208 52	0,472	174
50	$8,8 \cdot 10^{13}$	1 566	153	205	0,767	$8,8 \cdot 10^{13}$	1 464	114	205 51	0,575	191
55	$8 \cdot 10^{13}$	1 682	166	203	0,917	$8 \cdot 10^{13}$	1 572	124	203 51	0,688	207
60	$7,3 \cdot 10^{13}$	1 796	179	201	1,08	$7,3 \cdot 10^{13}$	1 678	134	201 50	0,810	224
65	$6,8 \cdot 10^{13}$	1 907	192	199	1,25	$6,8 \cdot 10^{13}$	1 782	144	199 50	0,941	240
70	$6,3 \cdot 10^{13}$	2 016	205	197	1,44	$6,3 \cdot 10^{13}$	1 884	154	197 49	1,08	256
75	$5,9 \cdot 10^{13}$	2 122	218	195	1,64	$5,9 \cdot 10^{13}$	1 984	163	195 49	1,23	272
80	$5,5 \cdot 10^{13}$	2 228	230	194	1,85	$5,5 \cdot 10^{13}$	2 082	173	194 48	1,39	288
85	$5,2 \cdot 10^{13}$	2 332	243	192	2,07	$5,2 \cdot 10^{13}$	2 179	182	192 48	1,56	304
90	$4,9 \cdot 10^{13}$	2 434	255	191	2,31	$4,9 \cdot 10^{13}$	2 275	191	191 48	1,73	319
Diode PvN de redressement ; à avalanche contrôlée TJB à V_{SAT} un peu élevé + aire de sécurité améliorée					Diode PvN rapide — TJB optimisé en V_{SAT} — Thyristor et/ou TGB asymétriques rapides — MOS de puissance verticale					Thyr Symétr. TGB ordinaire	

ANNEXE I.2

CALCUL DE ZONE v (PvN OU PvP). Entrée avec résistivité de zone v

Résis- tivité zone v nominale ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Jonction abrupte non tronquée (voir figures 3.6 et 3.7)					Jonction abrupte tronquée optimale (voir figures 3.6 et 3.7)					PvP = jonction abrupte non tronquée sauf W_{PvP} (μm)
	N_M (cm^{-3})	V_M (V)	W_M (μm)	E_M (kV.cm $^{-1}$)	R_M^* ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	N_{vopt} (cm^{-3})	V_{vopt} (V)	W_{vopt} (μm)	$\frac{E_{Mopt}}{E_{vopt}}$ (kV.cm $^{-1}$)	R_{vopt}^* ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	
	$44 \cdot 10^{14} \rho_M^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{13} N_M^{-3/4}$	$2,86 \cdot 10^{-2} V_M^{7/8}$	$700 V_M^{-1/8}$ $= 335 \rho_M^{-1/8}$	$7,87 \cdot 10^{-9} V_M^{1,5}$ (à 25°C)	$1,47 \cdot 10^{18} V_v^{-4/3}$	$V_M/1,07$	$0,75 W_M$	$\frac{E_M}{E_M/4}$	$0,75 R_M^*$ (à 25°C)	$= 1,25 W_M$
95	$4,6 \cdot 10^{13}$	2 535	268	190	2,55	$4,6 \cdot 10^{13}$	2 369	201	$\frac{190}{47}$	1,92	335
100	$4,4 \cdot 10^{13}$	2 634	280	188	2,81	$4,4 \cdot 10^{13}$	2 462	210	$\frac{188}{47}$	2,11	350
110	$4 \cdot 10^{13}$	2 829	304	186	3,36	$4 \cdot 10^{13}$	2 644	228	$\frac{186}{47}$	2,52	380
120	$3,7 \cdot 10^{13}$	3 020	328	184	3,96	$3,7 \cdot 10^{13}$	2 822	246	$\frac{184}{46}$	2,97	410
130	$3,4 \cdot 10^{13}$	3 207	352	182	4,60	$3,4 \cdot 10^{13}$	2 997	264	$\frac{182}{46}$	3,45	440
140	$3,1 \cdot 10^{13}$	3 390	376	181	5,29	$3,1 \cdot 10^{13}$	3 168	282	$\frac{181}{45}$	3,96	470
150	$2,9 \cdot 10^{13}$	3 570	399	179	6,02	$2,9 \cdot 10^{13}$	3 337	299	$\frac{179}{45}$	4,51	499
160	$2,8 \cdot 10^{13}$	3 747	422	178	6,79	$2,8 \cdot 10^{13}$	3 502	317	$\frac{178}{44}$	5,09	528
170	$2,6 \cdot 10^{13}$	3 922	445	176	7,61	$2,6 \cdot 10^{13}$	3 665	334	$\frac{176}{44}$	5,71	557
180	$2,4 \cdot 10^{13}$	4 093	468	175	8,47	$2,4 \cdot 10^{13}$	3 826	351	$\frac{175}{44}$	6,35	585
190	$2,3 \cdot 10^{13}$	4 263	491	174	9,37	$2,3 \cdot 10^{13}$	3 984	368	$\frac{174}{43}$	7,03	614
200	$2,2 \cdot 10^{13}$	4 430	513	173	10,3	$2,2 \cdot 10^{13}$	4 140	385	$\frac{173}{43}$	7,74	642
220	$2 \cdot 10^{13}$	4 758	558	171	12,3	$2 \cdot 10^{13}$	4 447	419	$\frac{171}{43}$	9,25	698
240	$1,8 \cdot 10^{13}$	5 079	602	169	14,5	$1,8 \cdot 10^{13}$	4 747	452	$\frac{169}{42}$	10,9	753
Diode PvN de redressement ; à avalanche contrôlée TJB à V_{SAT} un peu élevé + aire de sécurité améliorée						Diode PvN rapide — TJB optimisé en V_{SAT} — Thyristor et/ou TGB asymétriques rapides — MOS de puissance verticale					Thyr Symétr. TGB ordinaire

ANNEXE II.1

FICHIERS D'ENTRÉE TYPIQUES DU SIMULATEUR ATLAS / PISCES

Simulation électrique pour définir la tension de claquage de DPHT

Définition du MAILLAGE:

MESH CYLINDRICAL OUTFILE = dpht1cyl SPACE.MULT = 1

x. mesh loc = 0.0 spac = 50

x. mesh loc = 1250 spac = 50

y. mesh loc = 0.0 spac = 1.5

y. mesh loc = 30.0 spac = 1.5

y. mesh loc = 200 spac = 50

y. mesh loc = 300 spac = 1.5

Déclaration des RÉGIONS:

REGION number = 1 y.max = 1.5 material = Nitride

REGION number = 2 x.min = 300 x.max = 1250 y.max = 1.5 material = SiO₂

REGION number = 3 y.min = 3.0 material = Silicon

Déclaration des ELECTRODES:

ELECTRODE name = anode number = 1 x.min = 0 x.max = 300 y.min = 1.5

y.max = 3.0

ELECTRODE name = cathode number = 2 bottom

Déclaration du PROFIL DE DOPAGE:

DOPING uniform conc = 4.4e13 n. type direction = y region = 3 outfile = dphtop1

DOPING gaussian junction = 15.0 peak = 4.5 conc = 1.7e15 p.type x.right = 850

x.left = 300 y.top = 3

DOPING gaussian junction = 7.5 peak = 3.0 conc = 8.0e19 p.type x.right = 350

y.top = 3


```

DOPING gaussian characteristic = 0.1 peak = 300 conc = 5e19 n.type direction = y
TONYPLOT -st dpht1cyl
*****

# Charge interface:
INTERFACE x.min = 300 x.max = 1250 y.min = 1.5 s.n = 0.0 s.p = 0.0 qf = 1e10
*****

# Définir les MODELS:
MODELS bipolar print carr = 2
MATERIAL material = silicon etrap = 0.0 taun0 = 1e-5 taup0 = 1e-5 nsrhn = 5e16
nsrhp = 5e16 lt. taun = 0.0 lt.taup = 0.0
impact selb
output flowlines
*****

METHOD Newton trap maxtraps = 10 autonr itlimit = 25
SOLVE init
SOLVE prev

log outfile = cathode.log master
*****

SOLVE vanode = 0 vcathode = 0.2 name = cathode vstep = 0.2 nstep = 29
SOLVE vanode = 0 vcathode = 6 name = cathode vstep = 10 nstep = 10
SOLVE vanode = 0 vcathode = 106 name = cathode vstep = 10 nstep = 10
SOLVE vanode = 0 vcathode = 206 name = cathode vstep = 100 nstep = 10
SOLVE vanode = 0 vcathode = 1206 name = cathode vstep = 50 vfinal = 2800 ioniz
ionlines = 100 lratio = 0.7 deltav = 0.7

SAVE outf = cathode1.str
*****

TONYPLOT cathode1.str
TONYPLOT cathode.log
*****

Quit

```

ANNEXE II.2

SIMULATION DE LA SENSIBILITE DE LA TENUE EN TENSION
VIS-À-VIS DE L'IMPLANTATION DE LA POCHE π

N_V cm^{-3}	W_V μm	x_{jP+} μm	C_{SP+} cm^{-3}	$x_{j\pi}$ μm	$C_{S\pi}$ cm^{-3}	Q^*_{π} cm^{-2}	L_{π} μm	BU V	E_M V.cm^{-1}	Y_M μm	X_M μm
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	9	$1 \cdot 10^{14}$	$0,09 \cdot 10^{12}$	500	1450	$3 \cdot 10^5$	351	6,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	9	$5 \cdot 10^{14}$	$0,26 \cdot 10^{12}$	500	1650	$2,32 \cdot 10^5$	317	8,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	9	$9 \cdot 10^{14}$	$0,41 \cdot 10^{12}$	500	1800	$2,27 \cdot 10^5$	323	10,1
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	9	$1 \cdot 10^{15}$	$0,45 \cdot 10^{12}$	500	1850	$2,22 \cdot 10^5$	335	10,1
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	9	$2 \cdot 10^{15}$	$0,82 \cdot 10^{12}$	500	2150	$1,95 \cdot 10^5$	348	11,3
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	9	$2,5 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{12}$	500	1500	$2,16 \cdot 10^5$	857	9,8
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	9	$3 \cdot 10^{15}$	$1,17 \cdot 10^{12}$	500	1080	$2,29 \cdot 10^5$	859	9,9
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	9	$4 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	500	1050	$2,3 \cdot 10^5$	850	10,3

Quand $x_{j\pi} = 9 \mu\text{m}$ la tenue en tension maximale est obtenue pour
 $Q^*_{\pi\text{opt}} = 0,82 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et vaut $BU_{\text{max}} = 2150 \text{ V}$

Figure A II.2.1 : $x_{j\pi} = 9 \mu\text{m}$

N_V cm^{-3}	W_V μm	x_{jP+} μm	C_{SP+} cm^{-3}	$x_{j\pi}$ μm	$C_{S\pi}$ cm^{-3}	Q^*_{π} cm^{-2}	L_{π} μm	BU V	E_M V.cm^{-1}	Y_M μm	X_M μm
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$1 \cdot 10^{14}$	$0,12 \cdot 10^{12}$	500	1300	$2,71 \cdot 10^5$	357	6,6
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$5 \cdot 10^{14}$	$0,34 \cdot 10^{12}$	500	1700	$2,21 \cdot 10^5$	319	10,2
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$8 \cdot 10^{14}$	$0,5 \cdot 10^{12}$	500	1850	$2,16 \cdot 10^5$	319	11,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$9 \cdot 10^{14}$	$0,55 \cdot 10^{12}$	500	1900	$2,14 \cdot 10^5$	322	13,2
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$1 \cdot 10^{15}$	$0,61 \cdot 10^{12}$	500	1950	$2,07 \cdot 10^5$	325	13,1
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$1,5 \cdot 10^{15}$	$0,85 \cdot 10^{12}$	500	2150	$1,93 \cdot 10^5$	347	14,3
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$1,7 \cdot 10^{15}$	$0,95 \cdot 10^{12}$	500	2300	$1,90 \cdot 10^5$	347	14,3
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$2 \cdot 10^{15}$	$1,09 \cdot 10^{12}$	500	1500	$2,16 \cdot 10^5$	850	11,9
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$2,5 \cdot 10^{15}$	$1,33 \cdot 10^{12}$	500	1100	$2,29 \cdot 10^5$	851	11,3
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$3 \cdot 10^{15}$	$1,55 \cdot 10^{12}$	500	1050	$2,27 \cdot 10^5$	850	11,3
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	12	$3,5 \cdot 10^{15}$	$1,78 \cdot 10^{12}$	500	1000	$2,23 \cdot 10^5$	850	11,9

Quand $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$ la tenue en tension maximale est obtenue pour
 $Q^*_{\pi\text{opt}} = 0,95 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et vaut $BU_{\text{max}} = 2300 \text{ V}$

Figure A II.2.2 : $x_{j\pi} = 12 \mu\text{m}$

N_V cm^{-3}	W_V μm	x_{jP+} μm	C_{SP+} cm^{-3}	$x_{j\pi}$ μm	$C_{S\pi}$ cm^{-3}	Q^*_{π} cm^{-2}	L_{π} μm	B U V	E_M V.cm^{-1}	Y_M μm	X_M μm
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	15	$1 \cdot 10^{14}$	$0,15 \cdot 10^{12}$	500	1100	$2,3 \cdot 10^5$	352	6,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	15	$5 \cdot 10^{14}$	$0,43 \cdot 10^{12}$	500	1650	$2,15 \cdot 10^5$	319	13,2
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	15	$1 \cdot 10^{15}$	$0,75 \cdot 10^{12}$	500	2050	$1,98 \cdot 10^5$	336	15,9
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	15	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,06 \cdot 10^{12}$	500	2450	$1,87 \cdot 10^5$	340	17,1
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	15	$1,7 \cdot 10^{15}$	$1,18 \cdot 10^{12}$	500	1450	$2,01 \cdot 10^5$	853	11,9
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	15	$2 \cdot 10^{15}$	$1,36 \cdot 10^{12}$	500	1150	$2,21 \cdot 10^5$	853	12,8
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	15	$3 \cdot 10^{15}$	$1,94 \cdot 10^{12}$	500	1075	$2,2 \cdot 10^5$	854	14,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	15	$4 \cdot 10^{15}$	$2,5 \cdot 10^{12}$	500	1050	$2,2 \cdot 10^5$	855	14,3

Quand $x_{j\pi} = 15 \mu\text{m}$ la tenue en tension maximale est obtenue pour
 $Q^*_{\pi\text{opt}} = 1,06 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et vaut $BU_{\text{max}} = 2450 \text{ V}$

Figure A II.2.3 : $x_{j\pi} = 15 \mu\text{m}$

N_V cm^{-3}	W_V μm	x_{jP+} μm	C_{SP+} cm^{-3}	$x_{j\pi}$ μm	$C_{S\pi}$ cm^{-3}	Q^*_{π} cm^{-2}	L_{π} μm	B U V	E_M V.cm^{-1}	Y_M μm	X_M μm
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	18	$1 \cdot 10^{14}$	$0,18 \cdot 10^{12}$	500	1120	$2,3 \cdot 10^5$	353	6,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	18	$3 \cdot 10^{14}$	$0,35 \cdot 10^{12}$	500	1500	$2,2 \cdot 10^5$	318	10,3
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	18	$4 \cdot 10^{14}$	$0,43 \cdot 10^{12}$	500	1500	$2,1 \cdot 10^5$	321	14,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	18	$1 \cdot 10^{15}$	$0,92 \cdot 10^{12}$	500	2200	$1,9 \cdot 10^5$	346	19
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	18	$1,3 \cdot 10^{15}$	$1,13 \cdot 10^{12}$	500	2620	$1,87 \cdot 10^5$	356	20
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	18	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,27 \cdot 10^{12}$	500	1300	$2,1 \cdot 10^5$	857	16
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	18	$1,7 \cdot 10^{15}$	$1,42 \cdot 10^{12}$	500	1150	$2,22 \cdot 10^5$	859	16
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	18	$2,5 \cdot 10^{15}$	$2,0 \cdot 10^{12}$	500	1100	$2,2 \cdot 10^5$	852	15,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	18	$3 \cdot 10^{15}$	$2,3 \cdot 10^{12}$	500	1050	$2,2 \cdot 10^5$	852	16

Quand $x_{j\pi} = 18 \mu\text{m}$ la tenue en tension maximale est obtenue pour
 $Q^*_{\pi\text{opt}} = 1,13 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et vaut $BU_{\text{max}} = 2620 \text{ V}$

Figure A II.2.4 : $x_{j\pi} = 18 \mu\text{m}$

N_V cm^{-3}	W_V μm	x_{jP+} μm	C_{SP+} cm^{-3}	$x_{j\pi}$ μm	$C_{S\pi}$ cm^{-3}	Q^*_{π} cm^{-2}	L_{π} μm	BU V	E_M $V.\text{cm}^{-1}$	Y_M μm	X_M μm
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	21	$1 \cdot 10^{14}$	$0,21 \cdot 10^{12}$	500	1020	$2,4 \cdot 10^5$	355	6,6
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	21	$3 \cdot 10^{14}$	$0,4 \cdot 10^{12}$	500	1500	$2,1 \cdot 10^5$	319	13,8
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	21	$5 \cdot 10^{14}$	$0,6 \cdot 10^{12}$	500	1800	$2 \cdot 10^5$	322	17,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	21	$9 \cdot 10^{14}$	$0,96 \cdot 10^{12}$	500	2200	$1,88 \cdot 10^5$	342	21,9
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	21	$1,1 \cdot 10^{15}$	$1,16 \cdot 10^{12}$	500	2650	$1,92 \cdot 10^5$	360	23,1
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	21	$1,3 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{12}$	500	1350	$2,1 \cdot 10^5$	860	17,4
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	21	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	500	1200	$2,2 \cdot 10^5$	862	17,4
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	21	$2,5 \cdot 10^{15}$	$2,3 \cdot 10^{12}$	500	1150	$2,21 \cdot 10^5$	855	17,3
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	21	$3 \cdot 10^{15}$	$2,7 \cdot 10^{12}$	500	1110	$2,2 \cdot 10^5$	853	18,8

Quand $x_{j\pi} = 21 \mu\text{m}$ la tenue en tension maximale est obtenue pour
 $Q^*_{\pi\text{opt}} = 1,16 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et vaut $BU_{\text{max}} = 2650 \text{ V}$

Figure A II.2.5 : $x_{j\pi} = 21 \mu\text{m}$

N_V cm^{-3}	W_V μm	x_{jP+} μm	C_{SP+} cm^{-3}	$x_{j\pi}$ μm	$C_{S\pi}$ cm^{-3}	Q^*_{π} cm^{-2}	L_{π} μm	BU V	E_M $V.\text{cm}^{-1}$	Y_M μm	X_M μm
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	24	$1 \cdot 10^{14}$	$0,23 \cdot 10^{12}$	500	1000	$2,4 \cdot 10^5$	354	6,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	24	$3 \cdot 10^{14}$	$0,46 \cdot 10^{12}$	500	1600	$2,1 \cdot 10^5$	316	14,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	24	$5 \cdot 10^{14}$	$0,68 \cdot 10^{12}$	500	1850	$1,95 \cdot 10^5$	328	20,6
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	24	$9 \cdot 10^{14}$	$1,1 \cdot 10^{12}$	500	2300	$1,9 \cdot 10^5$	356	24,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	24	$9,5 \cdot 10^{14}$	$1,18 \cdot 10^{12}$	500	2650	$1,9 \cdot 10^5$	360	24,6
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	24	$1 \cdot 10^{15}$	$1,2 \cdot 10^{12}$	500	2350	$1,75 \cdot 10^5$	873	17
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	24	$1,3 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{12}$	500	1200	$2,13 \cdot 10^5$	855	18,8
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	24	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,69 \cdot 10^{12}$	500	1200	$2,18 \cdot 10^5$	853	18,7
$4,4 \cdot 10^{13}$	280	4,5	$8 \cdot 10^{19}$	24	$2 \cdot 10^{15}$	$2,17 \cdot 10^{12}$	500	1150	$2,14 \cdot 10^5$	856	18,8

Quand $x_{j\pi} = 24 \mu\text{m}$ la tenue en tension maximale est obtenue pour
 $Q^*_{\pi\text{opt}} = 1,2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et vaut $BU_{\text{max}} = 2650 \text{ V}$

Figure A II.2.6 : $x_{j\pi} = 24 \mu\text{m}$

ANNEXE III.1

FICHIERS D'ENTRÉE TYPIQUES DU SIMULATEUR

ATHENA / SUPREM

Simulation technologique pour la filière "rapide CIME"

Définition du maillage:

x. mesh loc = 0.0 spac = 0.1

x. mesh loc = 1.00 spac = 0.1

y. mesh loc = - 2.0 spac = 0.05

y. mesh loc = 2.0 spac = 1.0

y. mesh loc = 18 spac = 1.0

y. mesh loc = 30 spac = 5.0

Initialisation

INIT silicon c.phosphor = 4.4e13 orientation = 100

IMPURITY i.boron silicon / oxide Seg.0 = 31.5 Seg.E = 0.527

Réalisation de l'oxyde de champ

methode fermi compress

DIFFUS time = 120 temp = 800 t.final = 1050 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0

methode fermi compress

DIFFUS time = 330 temp = 1050 wet O2 press = 1.00 hcl.pc = 0

methode fermi compress

DIFFUS time = 60 temp = 1050 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0

methode fermi compress

DIFFUS time = 120 temp = 1050 t.final = 800 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0

EXTRACT name = "esio2" thickness material = "SiO-2" mat.ocno = 1

Gravure de l'oxyde avant implantation

ETCH oxide all

Implantation de la poche π

IMPLANT boron dose = 4e12 energy = 160 pearson tilt = 7 rotation = 0

```
# Diffusion de la poche  $\pi$ 
methode fermi compress
DIFFUS time = 180 temp = 750 t.final = 1160 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0
methode fermi compress
DIFFUS time = 6000 temp = 1160 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0
methode fermi compress
DIFFUS time = 180 temp = 1160 t.final = 750 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0
struct outfile = impp.str
TONYPLOT impp.str
EXTRACT name = "xj" xj material = "Silicon" mat.occno = 1 x.val = 1 junc.occno = 1
EXTRACT name = "Cs" surf.conc impurity = "Boron" material = "Silicon" mat.occno = 1
x.val = 1
EXTRACT name = "Rc" sheet.res material = "Silicon" mat.occno = 1 x.val = 1
region.occno = 1
*****

# Réalisation de la couche P+
## Oxydation préimplantation
methode fermi compress
DIFFUS time = 120 temp = 800 t.final = 1050 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0
methode fermi compress
DIFFUS time = 70 temp = 1050 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0
methode fermi compress
DIFFUS time = 120 temp = 1050 t.final = 800 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0
EXTRACT name = "eSiO2" thickness material = "SiO-2" mat.occno = 1 x.val = 1
*****

# Implantation Bore à travers l'oxyde pour la couche P+
IMPLANT boron dose = 1e15 energy = 160 pearson tilt = 7 rotation = 0
*****

# Diffusion de la couche P+
methode fermi compress
DIFFUS time = 180 temp = 750 t.final = 1130 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0
methode fermi compress
DIFFUS time = 30 temp = 1130 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0
methode fermi compress
DIFFUS time = 270 temp = 1130 N2 press = 1.00 hcl.pc = 0
methode fermi compress
DIFFUS time = 180 temp = 1130 t.final = 750 dry O2 press = 1.00 hcl.pc = 0
```

```
struct outfile = impp+.str
TONYPLOT impp+.str
EXTRACT name = "xjp+" xj material = "Silicon" mat.occno = 1 x.val = 1 junc.occno = 1
EXTRACT name = "Cs" surf.conc impurity = "Boron" material = "Silicon" mat.occno = 1
x.val = 1
EXTRACT name = "Rc" sheet.res material = "Silicon" mat.occno = 1 x.val = 1
region.occno = 1
*****
Quit
```

ANNEXE III.2

**DIAGRAMME DE CHEMINEMENT
DPHT C1**

CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL

ANNEXE III.3

DIAGRAMME DE CHEMINEMENT DPHT C2

CONFIDENTIEL

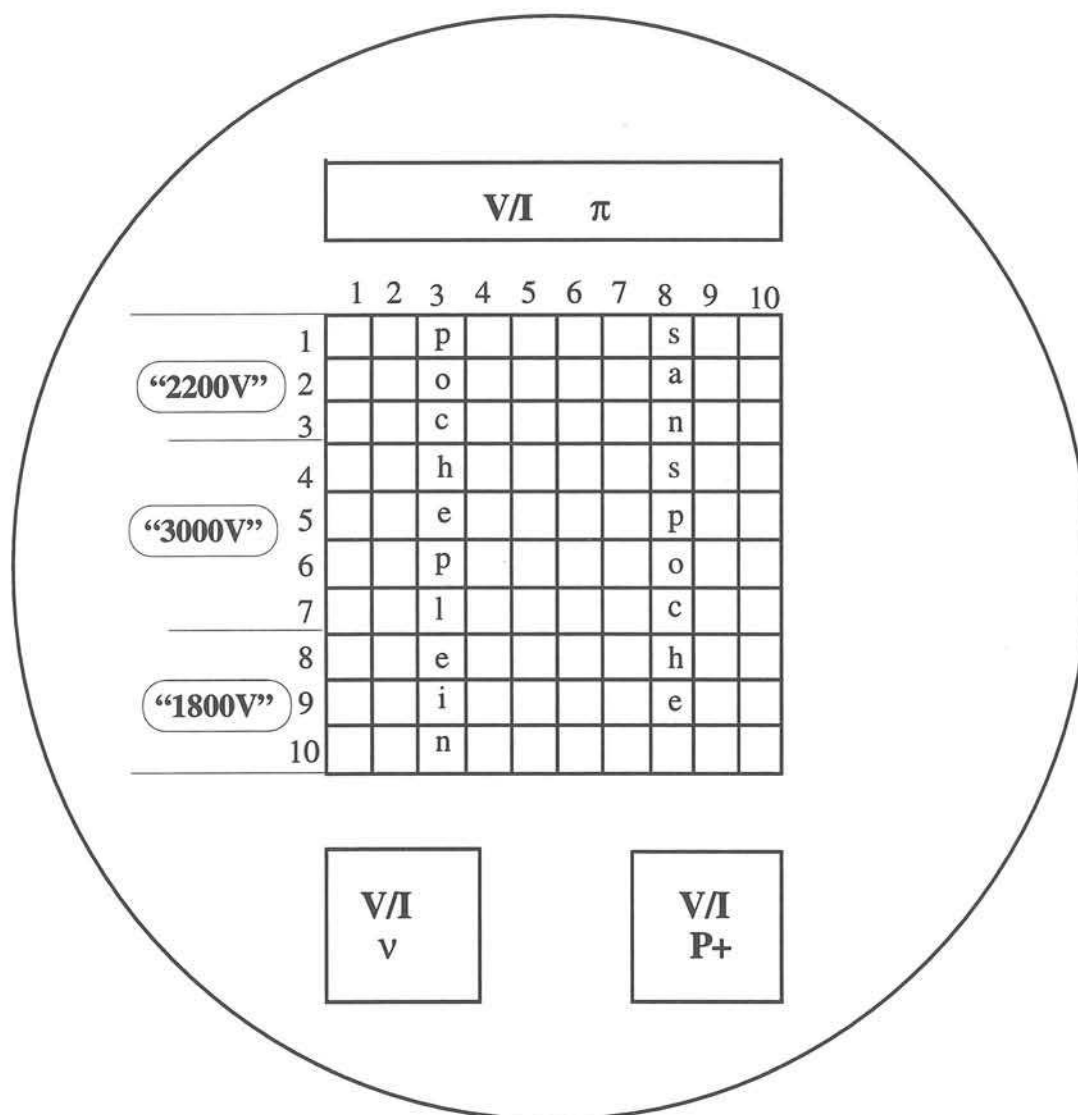
CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL

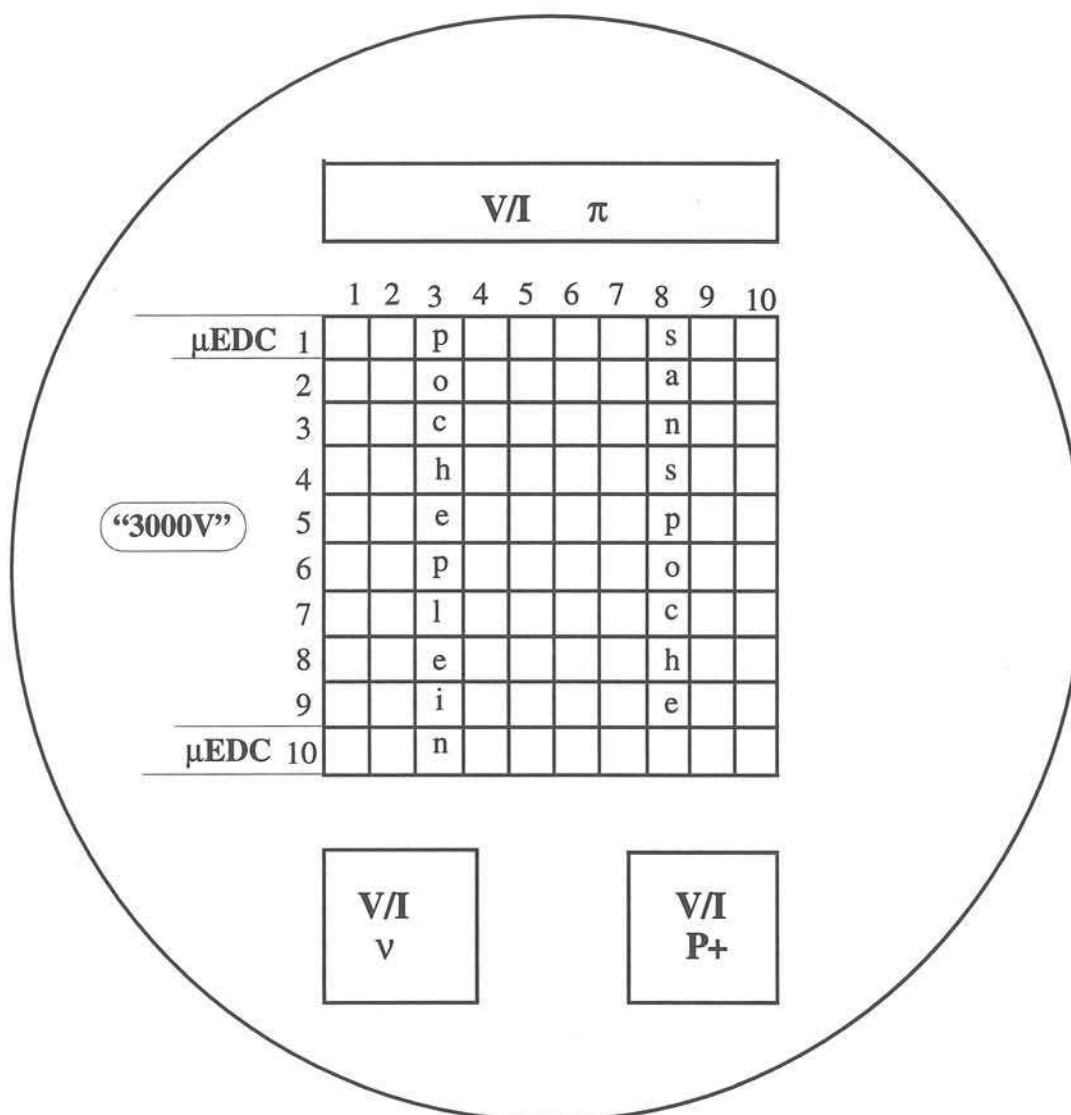
ANNEXE III.4

DISPOSITION GENERALE DE DPHT C1 MONOPOCCE SUR LA TRANCHE



ANNEXE III.5

DISPOSITION GENERALE DE DPHT C2 MONOPOCHE SUR LA TRANCHE



ANNEXE IV.1

DIAGRAMME DE CHEMINEMENT DPHT C3

CONFIDENTIEL

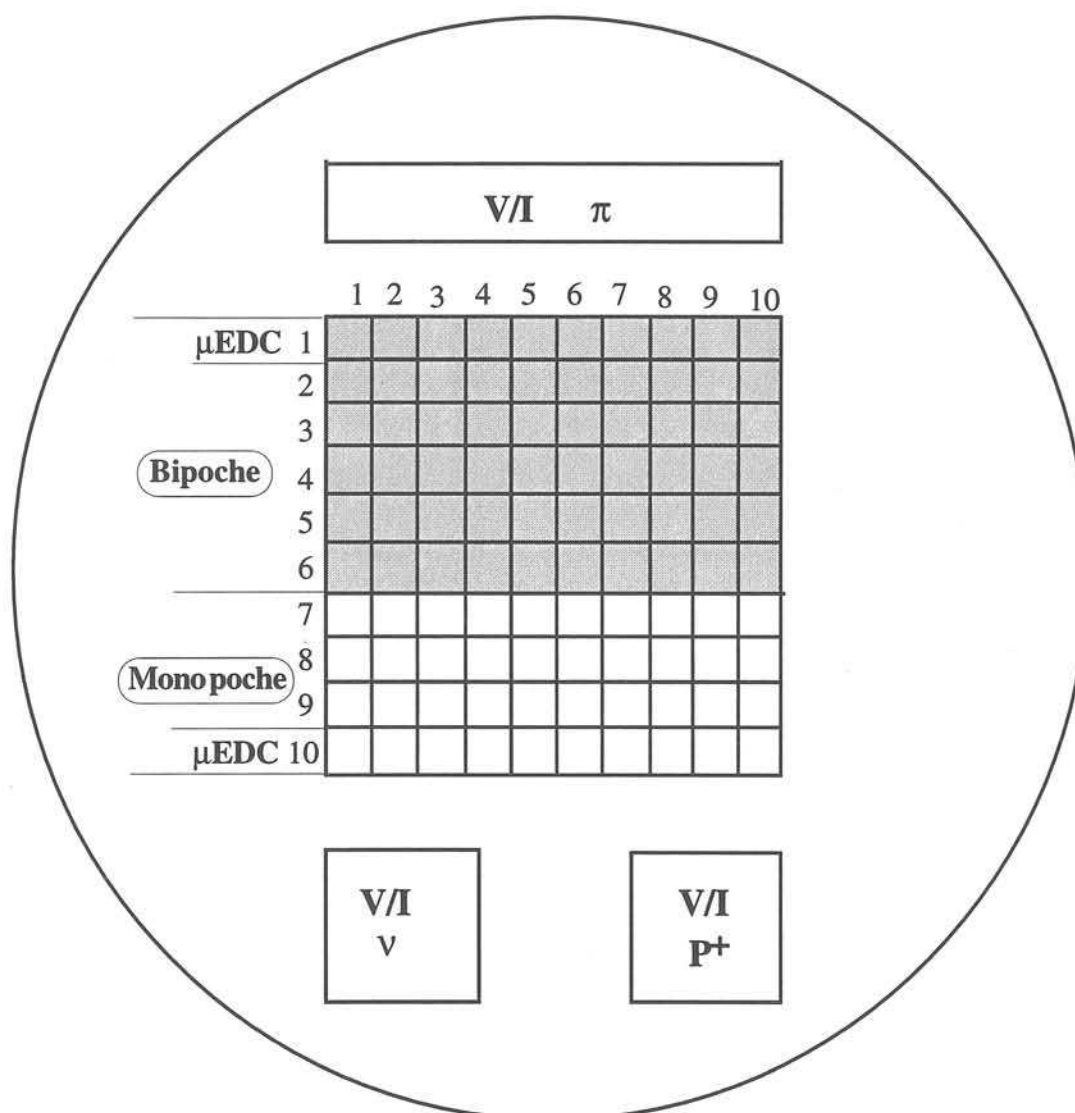
CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL

CONFIDENTIEL

ANNEXE IV.2

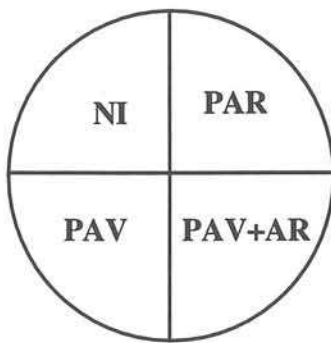
DISPOSITION GENERALE DE DPHT BIPOCHE ET MONOPOCHE SUR LA TRANCHE (DPHT C3)



ANNEXE V.1

CARTES DES LONGUEURS DE DIFFUSION ET DU COURANT DE FUITE MESURES SUR LES TRANCHES DE MANIPULATION "4 QUARTS"

(Faites au LPDSO - Saint Jérôme - Marseille)



NI: diodes sans implantation phosphore

PAR: diodes avec implantation phosphore Face Arrière

PAV+AR: diodes avec implantation phosphore Face Avant et Arrière

PAV: diodes avec implantation phosphore Face Avant

Cartes de longueurs de diffusion (μm) à -100 V mesurées sur la tranche n°4 - DPHT C2.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	14	12	11	14	X	X	22	33	24	24
2	17	12	21	16	X	X	21	X	22	21
3	18	18	23	20	X	X	30	27	33	12
4	18	22	23	20	X	X	31	X	35	29
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7	28	29	32	33	X	X	41	X	47	44
8	33	31	32	22	X	X	57	49	39	65
9	35	48	31	31	X	X	69	X	81	61
10	36	39	44	46	X	X	69	60	77	73

Cartes de courant de fuite (nA) à -100 V mesurés sur la tranche n°4 - DPHT C2.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	500	700	500	500	X	X	1900	30	28	26
2	550	530	570	500	X	X	250	X	230	260
3	500	540	500	440	X	X	260	22	200	180
4	460	500	520	430	X	X	280	X	160	170
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7	380	440	400	360	X	X	45	22,5	140	130
8	250	450	350	270	X	X	120	X	120	120
9	210	260	300	400	X	X	98	8,2	96,6	73
10	200	140	250	160	X	X	110	X	190	58

Cartes de longueurs de diffusion (μm) à -100 V mesurées sur la tranche n°8 - DPHT C2.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	61	66	68	60	96	115	98	78	110	120
2	61	63	63	75	112	131	91	X	80	82
3	51	49	53	54	99	114	105	76	90	97
4	49	47	58	54	73	123	103	X	93	79
5	62	X	57	X	65	X	107	X	94	95
6	64	X	52	X	73	X	102	115	103	108
7	89	97	87	94	93	158	135	X	111	147
8	88	77	106	70	90	96	141	122	109	115
9	95	83	62	77	116	114	192	X	108	108
10	90	84	83	81	144	112	105	92	113	126

Cartes de courant de fuite (nA) à -100 V mesurés sur la tranche n°8 - DPHT C2.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	63,5	60	67	47	X	X	22	3,6	34,3	51,5
2	71	38,7	48,2	39	X	X	40	X	32	51,6
3	60,2	40	37	37	X	X	40	3,9	37	47
4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
8	89	290	230	220	X	X	150	3,6	62,2	59
9	96	97	260	160	X	X	110	8,2	X	58,8
10	86,9	79,5	93,5	81	X	X	55,3	4,3	72,3	60

Cartes de longueurs de diffusion (μm) à -100 V mesurées sur la tranche n°12- DPHT C2.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	57	54	52	60	58	97	117	132	132	118
2	60	55	49	60	84	131	141	135	139	136
3	28	24	34	55	54	119	112	132	97	63
4	49	53	57	45	59	108	131	157	132	103
5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
6	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7	170	132	130	125	117	196	211	117	227	231
8	122	168	155	155	148	185	212	116	221	189
9	210	201	191	180	186	204	219	151	189	179
10	103	97	102	164	94	199	231	153	211	211

Cartes de longueurs de diffusion (μm) à -100 V mesurées sur la tranche n°14- DPHT C2.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	110	96	100	100	150	152	108	55	160	150
2	102	120	X	127	85	96	91	X	144	186
3	100	93	100	92	122	124	127	57	134	154
4	106	119	X	105	93	130	120	X	132	158
5	101	101	81	122	92	89	140	60	96	144
6	97	90	91	97	106	99	113	60	149	175
7	101	80	111	97	124	110	116	X	149	191
8	76	71	75	104	100	99	127	55	144	160
9	120	80	80	93	120	62	151	X	160	167
10	99	98	100	98	110	116	125	64	165	190

Cartes de courant de fuite (nA) à -100 V mesurés sur la tranche n°14- DPHT C2.

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	155	260	160	180	115	80	82	X	96	84
2	220	192	185	186	104	95	87	X	138	89
3	190	200	190	210	250	170	260	X	85	70
4	200	185	210	185	2300	1010	860	X	102	50
5	150	200	190	180	2400	280	1010	X	135	45
6	125	184	182	180	400	180	300	X	75	18
7	105	180	171	185	340	200	100	X	22	20
8	131	131	137	139	82	75	37	X	19	27
9	116	123	118	109	58	56	15	X	36	21
10	100	100	110	116	72	65	23	X	20	28

RESUME

L'objet de ce travail a consisté dans l'optimisation et réalisation d'une périphérie Planar haute tension, permettant d'obtenir une tenue en tension dépassant 2000V. Parmi des protections périphériques existantes la protection par l'implantation latérale appelée "poche" semblait être une solution très performante pour obtenir une tenue en tension très élevée.

Dans un premier temps, nous avons optimisé la structure de cette protection en utilisant des simulateurs bidimensionnels (ATHENA, ATLAS). Les résultats de simulation confirment que la dose active de cette périphérie est l'un des paramètres important à contrôler. La profondeur et la longueur de poche sont les deux autres paramètres à prendre en compte pour l'optimisation de cette périphérie. La variation de la tenue en tension est présentée en fonction de l'évolution de chacun de ces paramètres. Les résultats de l'étude de la sensibilité de la tenue en tension vis-à-vis de la dose active de la poche ont permis d'établir une méthodologie de conception d'une périphérie monopoeche optimale et de développer une périphérie bipoeche permettant de bien dominer la dose active de poche donc d'améliorer la tenue en tension.

Ensuite, pour valider les résultats de simulation en raison de simplification nous avons choisi la diode de type PIN comme élément de test. Nous avons réalisé et caractérisé les diodes avec différentes géométries des périphéries monopoeche et bipoeche. Les résultats expérimentaux obtenus sur la tenue en tension confirment que la périphérie bipoeche optimale permet d'atteindre des valeurs de claquage en volume. Ces résultats montrent à la fois la faisabilité des dispositifs et leurs bonnes performances.

Enfin, pour compléter notre étude de conception de périphérie Planar haute tension à poche nous avons étudié le courant de fuite des diodes réalisés. Nous avons mis en évidence que les charges dans l'oxyde et à l'interface ont une influence importante sur la tenue en tension et le courant de fuite.

Mots clés :

- Haute tension - Périphérie Planar - Protection périphérique - Poche - optimisation
- Diode de haute tension

ABSTRACT

The purpose of this work is to consist in the optimization and implementation of a high-voltage Planar periphery, which allowed to obtain the blocking-voltage more than 2000V. It appears that the periphery type pocket can satisfy the need in high-voltages ranges.

In the first time, based on 2D simulations using the ATHENA and ATLAS softwares, we have optimised this periphery. The results show that the active dose is one important parameter for to control. The junction depth and the length of the pocket are the other parameter influenced on the blocking-voltage. The variation of blocking-voltage has been presented versus one of these parameters. Sensitivity analysis of blocking-voltage capability of the periphery single-pocket type in relation to the active dose gives a design methodology for optimum determination termination. Based on this study, we developed the periphery double-pocket type in order to well control the active dose and to improve the blocking-voltage.

Then, in order to validate the computed results, high-voltage test diodes are implemented in silicon. The experimental results show that the ideal breakdown voltage can be achieved with the optimum periphery double-pocket type. The experimental characteristic of blocking-voltages shows at one the feasibility and the excellent performance in reasonable agreement with the numerical results.

Finally, in the last section, the leakage currents of the test diodes are studied. The results clearly show that the charges in the field oxide have a great influence on the blocking-voltage and the leakage current of the devices.

Key - words :

- High-Voltage - Planar periphery - Periphery protection - Pocket - Optimisation
- Blocking-Voltage - High-Voltage Diode